Library and Information Centre
Canada Centre for Inland Waters (CCIW)
867 LAKESHORE ROAD - BURLINGTON
DEC 5 1985
Government Publications Officer
Transport Canada
Ottawa Canada

TP 6786 E

ULTRASONIC DOPPLER VELOCIMETER FOR ICEBREAKERS

Prepared for: Transportation Development Centre (TDC)
Transport Canada,
Montréal, Québec
June 1985

By: Raymond Roberge
Gentec Inc.,
Ste-Foy, Québec

RESEARCH TEAM

The Gentec research team was composed of:

Mr. C. Labbé, Eng.
Mr. R. Roberge
Dr. M. Verreault, phd.
Mr. M. Drouin
and others

ACKNOWLEDGEMENT

We thank the Canadian Coast Guard for their cooperation during the tests on the Des Groseillers.

DISCLAIMER

The contents of this report reflect the view of the Contractor and not necessarily the official views or policies of the Transportation Development Centre.

Également Disponible en Français: "Indicateur de vitesse Doppler à ultrasons pour brise-glaces". TP 6786 F.

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 6786E	4774/4779	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Ultrasonic Doppler Velocimeter for Icebreakers	June 1985
	6. Performing Organization Report No.
7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
Raymond Roberge	D1460-188
9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Gentec Inc. 2625 Dalton St. Ste-Foy, Quebec G1P 3S9	48SZ-T8200-2-2522
	11. DSS or Transport Canada Contract No.
	1SZ82-00068
12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
	R.S. Nishizaki

17. Abstract

The report describes the development and subsequent testing in ice fields of an ultrasonic velocimeter intended to measure precisely the speed of an operating icebreaker.

In the development phase, two basic velocimeter design principles were considered and laboratory measurements and tests conducted. Difficulties with the application of the interferometric principle led to the use of the second approach based on the Doppler effect.

Tests and measurements obtained in the ice field were performed using the Des Groseillers icebreaker. Data was collected to measure the background noise in the ultrasonic region.

Tests of a prototype velocimeter showed a weakness in the transmitter. The signal generated was found to be weaker than the background noise.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Speed measurement, ultrasonic, Doppler, velocimeter, icebreaker	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	21 + four appendices	nil

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. N° du rapport Transports Canada	2. N° de l'étude — CDT	3. N° de catalogue du destinataire
TP 6786E	4774/4779	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Ultrasonic Doppler Velocimeter for Icebreakers	juin 1985
	6. N° du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier Transports Canada
Raymond Roberge	D1460-188

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier — ASC
Gentec Inc. 2625 rue Dalton Ste-Foy, Québec G1P 3S9	48SZ-T8200-2-2522
	11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada 1SZ82-00068

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy Favreau 200 ouest, boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montreal, Quebec H2Z 1X4	14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
	R.S. Nishizaki

17. Résumé

Ce rapport relate les travaux de développement, ainsi que les essais dans les champs de glace, d'un système ultrasonore devant mesurer précisément la vitesse d'un brise-glace en condition d'opération.

Dans la partie consacrée aux travaux de développement, le rapport décrit brièvement les principes de base des systèmes envisagés et les essais en laboratoire correspondant. Des difficultés d'application de la méthode interférométrique ont forcé le développement d'une deuxième approche fondée sur l'effet Doppler.

Les mesures et les essais en champs de glace furent effectués à bord du Des Groseillers. Les premières données portèrent principalement sur la mesure du bruit de fond. Suite à la production d'un prototype, des essais démontrent une faiblesse du côté de l'émission et de la détection du signal.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Mesure de la vitesse, effet Doppler, ultra-son, vélocimètre, brise-glace	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifié	Non classifiée	21 + quatre appendices	aucun

CDT/TDC 79-005

SUMMARY

This report presents the work performed between September 28, 1982 and May 30, 1985, to develop a high-precision velocimeter for use on icebreakers. A system based on the use of ultrasonics utilizing the Doppler principle was designed. A laboratory model built and tested produced satisfactory results. Tests with a prototype system performed on the icebreaker Des Groseillers gave a good idea of the performance of the system under actual operating conditions. After resolving various problems associated with low temperature operation and vibration experienced on the icebreaker, it was concluded that the use of a more powerful ultrasonic source was necessary.

TABLE OF CONTENTS

		PAGE
1.	INTRODUCTION	1
2.	BASIC PRINCIPLES	
2.1	The interferometer principle	2
2.2	The Doppler effect	3
3.	BACKGROUND NOISE MEASUREMENT ON A ICEBREAKER	
3.1	The measurement set up	4
3.2	Test conditions	5
3.3	Results from noise measurements	5
4.	DESIGN AND CONSTRUCTION OF LABORATORY SET-UP	
4.1	Model using the interferometric principle	9
4.2	Model using the Doppler principle	10
5.	RESULTS OF LABORATORY TESTS	
5.1	Results on the interferometer system	11
5.2	Results on the Doppler system	11
6.	CONSTRUCTION OF THE PROTOTYPE	
6.1	System description	14
7.	RESULTS AND ANALYSIS OF TESTS PERFORMED ON THE ICEBREAKER	
7.1	Test of the prototype on the Des Groseillers icebreaker	18
7.2	Analysis of results	19
8.	CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	
8.1	Conclusions	21
8.2	Recommendations	21

Appendix A: Analyse acoustique (vélocimètre ultrason)
Appendix B: Théorie de la détection hétérodyne
Appendix C: Les détecteurs-émetteurs CP Channel
Appendix D: Les détecteurs ultrasonores de Supratec.

LIST OF FIGURES

		PAGE
Figure 1	Interferometric Method of measuring speed	2
Figure 2	Method of measuring speed using the Doppler effect	3
Figure 3	Back-ground noise measurement locations	4
Figure 4	Measurement position no. 1	5
Figure 5	Measurement position no. 2	5
Figure 6	Set-up use on the icebreaker	7
Figure 7	Back-ground noise while docked	7
Figure 8	Back-ground noise in open water	8
Figure 9	Back-ground noise in an ice-field	8
Figure 10	Set-up used to measure speed using the interferometer method	9
Figure 11	Set-up used to measure the speed using the Doppler effect	10
Figure 12a)	Graphical representation of the results presented in Table 1.	13
Figure 12B)	Graphical representation of the results presented in Table 2.	13
Figure 13	Schematic representation of the prototype velocimeter	14
Figure 14	Schematic representation of the transceiver	16
Figure 15	The velocimeter system	17
Figure 16	Test location of the velocimeter on the icebreaker	20

LIST OF TABLES PAGE

Table 1	Comparative test of computed speed and indicated speed (Test of November 14, 1983)	12
Table 2	Comparative test of computed speed and indicated speed (Test of November 15, 1983)	12

1. INTRODUCTION

The report presents the research and development work carried out on a project originating from a unsolicited proposal and supported by the Transportation Development Center of Transport Canada. The main effort was directed on the development of an ultrasonic Doppler velocimeter for application on an incebreaker.

Prior to the submission of the technical proposal for this project, Gentec Inc. had worked on a similar system based on an HeNe Laser. This approach was abandoned because of safety problems arising from the high-energy source. The requirement for a high-precision velocimeter for use on icebreaker having been established form previous activities, Gentec presented the idea of a system based on the use of ultrasonics.

The technical difficulties encountered during this project were the back-ground noise, the very intense vibration and the high level of humidity encountered on an icebreaker. The ultrasonic source used proved not to be powerful enough for the purpose of this application. Consultations with Supratec did not result in a successful alternative ultrasonic source.

2. BASIC PRINCIPLES

2.1 The Interferometric Principle

When two waves sources (sound, light, etc.) generating the same frequency are directed toward the same observation plane, an interferometric set of fringes known as Young fringes occurs (see Figure 1). If the observation surface contains defects or imperfections with dimensions of the order of or less that the distance between two fringes, then a signal proportional to the number of fringes encountered by unit of time (the speed) is generated.

The conditions for a precise measurement are then; a) the generation of plane wave front and b) the availability of surface defects compatible with the inter-fringe distance (see the theoretical analysis of Appendix A). A icebreaker operating in an icefield encounter the kind of ice surface pattern necessary for the condition b). The first condition is met by an appropriate choice of large surface sources and sufficient distance between the source and the observation plane.

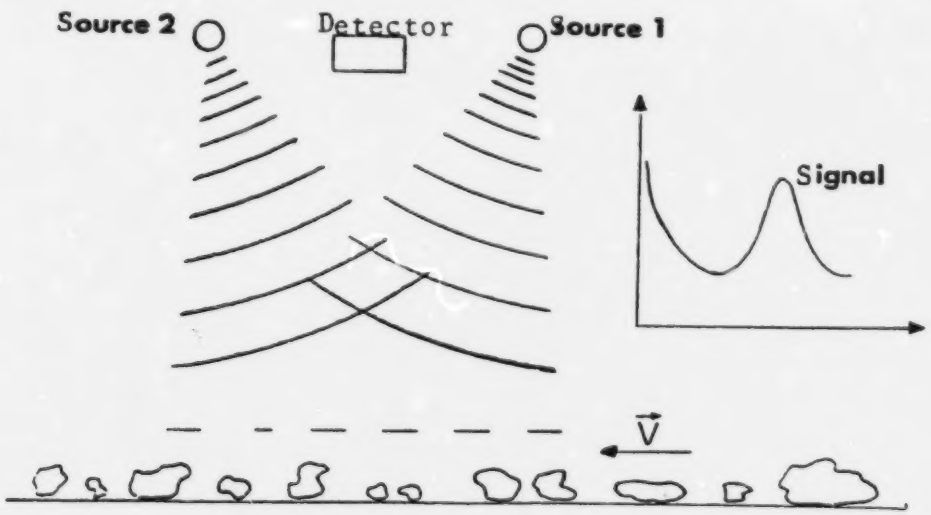


Figure 1: Interferometric Method of Measuring Speed

2.2 The Doppler Effect

When a sound wave is reflected from a moving surface, its frequency increases if the object velocity is directed toward the source and decrease if the object moves away from the source. The frequency shift is proportional to the relative speed between the source and the object.

This method needs only one ultrasonic source and one detector. This simplification over the preceding set-up reduces the number of error sources.

The relative speed, Δv between the ship and the ice field can be computed from the following equation:

$$\Delta v = \frac{\lambda \, \Delta f}{2 \cos(\alpha)}$$

λ wave length of the source
Δf frequency shift
α angle of observation

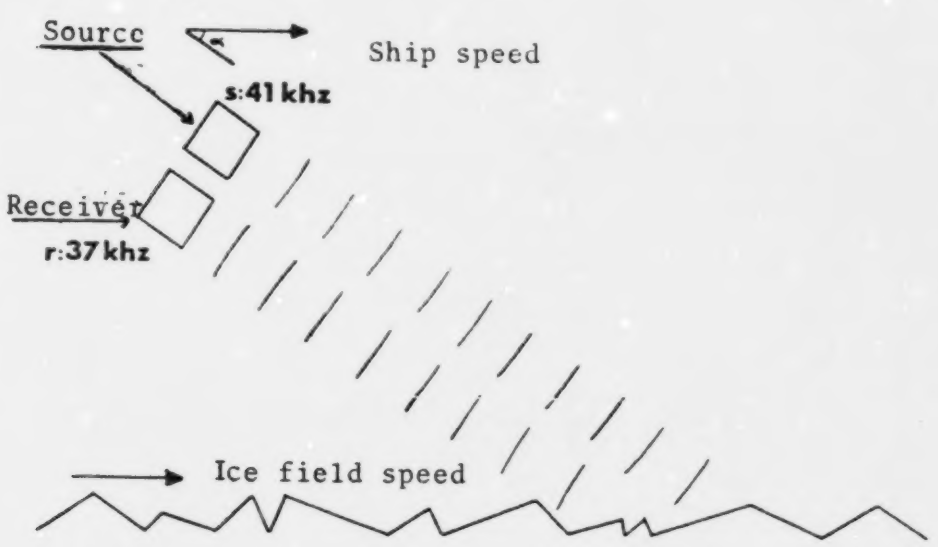


Figure 2: Method of Measuring Speed Using the Doppler Effect.

3. BACKGROUND NOISE MEASUREMENT ON AN ICEBREAKER

3.1 The Measurement Set-up.

The signal-to-noise ratio represents the main challenge in the use of a high-precision measuring device. A set-up composed of two high sensitivity wide-band microphone covering up to 50 k Hz, a spectrum analyser, an oscilloscope and a camera was use on the icebreaker Des Groseillers for the analysis of the background noise under operating conditions. Figure 3 shows the two locations used in the measurements. Position no. 1 was in the bow of the ship while Position no. 2 was on the forward left side.

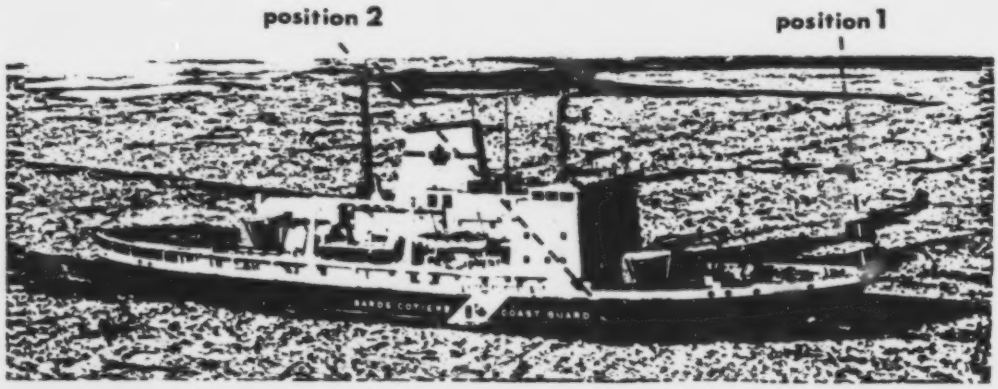


Figure 3: Back-ground Noise Measurement Locations.

At first the microphone was fixed simply to the ship and oriented towards the front as shown in Figure 4. Then it was mounted at Position no. 2 as in Figure 5. Later, a 12-inch parabolic mirror was added to the mocrophone to improve its focus on the target area. This was done to ensure that the target area was the one specifically desired for the speed measurement.

A special coaxial cable was used to link the microphone to the spectrum analyser located in a small cabin on the ship.

Figure 4: Measurement Position no. 1

Figure 5: Measurement Position no. 2

3.2 Test Conditions

Noise back-ground measurement at Position No.1 were gathered during a regular operation of the ice-breaker Des Groseillers on the Ste Lawrence River at Quebec City during the 1982-1983 winter. The test corresponding to Position No. 2 were performed on the Saguenay River at the end of the 1983 winter. During the test on the Saguenay the coaxial cable broke forcing the cancellation of the first part of the test. Only the data corresponding to the return of the ship were considered. Fortynately the captain agreed to deviate from the normal route in order to allow data to be gathered from a solid ice field.

3.3 Results from Noise Measurements.

The curves in Figures 7 to 9 give a resolution of 1 kHz with 5 kHz per centimetre on the horizontal scale and 10 db/cm on the vertical scale. On each of those figures the lower curve shows the electronic noise of the detection system.

The upper curve of Figure 7 shows the background noise level when the ship was standing still in the ice. In that case the noise affects only the first 20 kHz of the spectrum with a maximum of 30 db at about 5 kHz.

The upper curve of Figure 8 shows a general increase in the noise. The maximum frequency is 30 kHz. The recording of the ambient noise were obtained during operation in open water and includes the noise from the ship and from the waves.

Finally, the upper curve of Figure 9 corresponds to the operation of the icebreaker in an ice field. The drop in the noise at 50 kHz is due to the combined effect of lower noise level and lower sensitivity of the microphone. (Bruel & Kjaer model 4149 with ogive.) In that case a noise of nearly 25 db at 25 kHz and 12 db at 40 kHz is observed. The date shows the signal level from which a signal can be detected.

Figure 6: Set-up on the ice-breaker

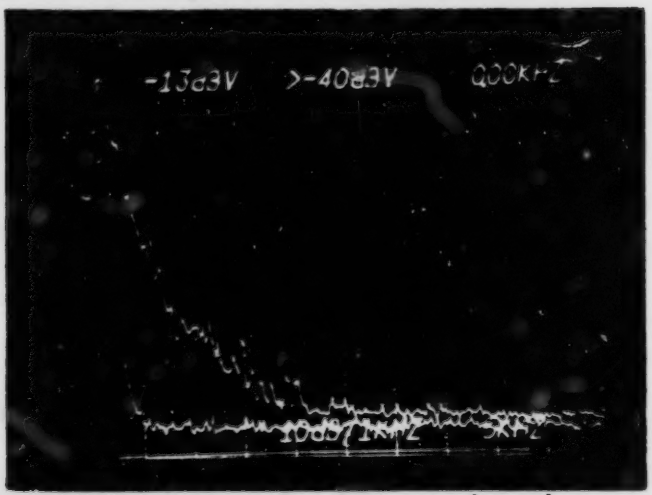


Figure 7: Back-ground noise at the pier

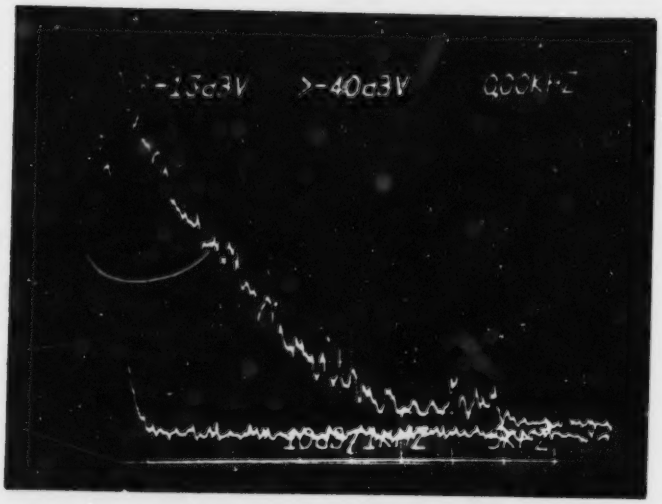


Figure 8: Background Noise in Open Water

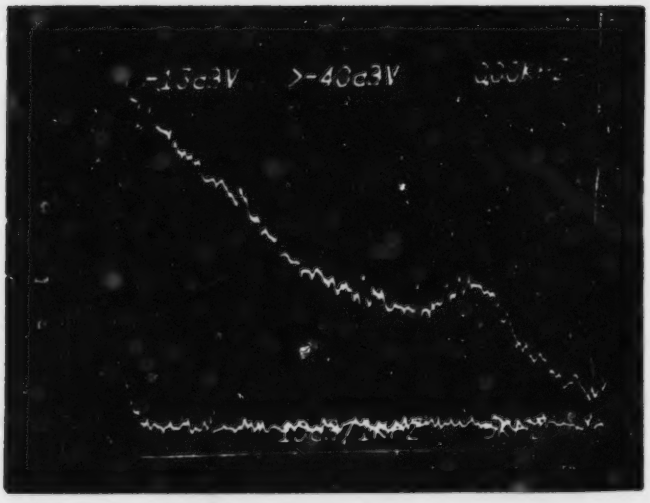


Figure 9: Background Noise in an Ice Field

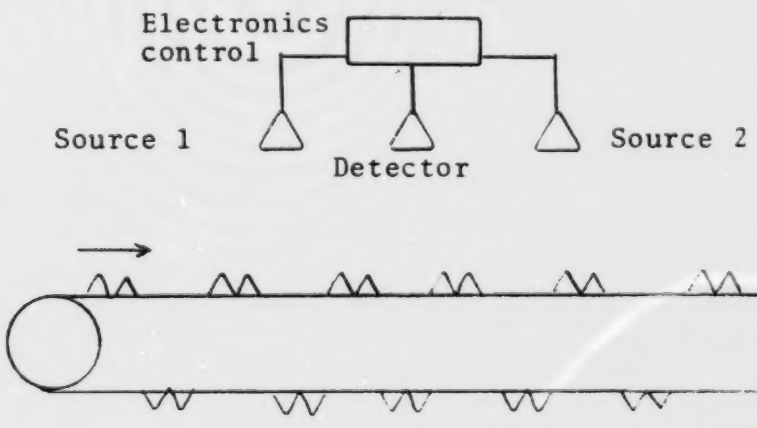
4. DESIGN AND CONSTRUCTION OF LABORATORY SET-UP

4.1 Model using the Interferometric Principle

The laboratory tests were performed with the help of a simulator made up of a flexible belt driven by a variable speed motor. Foam plastic targets covered with aluminium paper were attached to the moving surface. The size of those target was chosen to be a good representation of the defects observed on ice surfaces. The driving mechanism was mounted so as to allow back and forth motion to simulate the fore and aft motion of a ship.

The main problem encountered with the simulator were the background noise generated by the driving motor and the sound reflection on the laboratory wall and other objects.

The ultrasonic sources and detectors were vertically mounted in front of the simulator. During the tests the distance between the source and the belt was changed from 30 centimetres to 4 metres.



4.2 Model Using the Doppler Principle

The simulator used to test the Doppler set-up had the same reflecting surface as the one used for the interferemeter set-up. The main difference was the position used for the transceiver location. In this case it was necessary to get it nearly parallel to the ship motion. A comparison of Figures 2 and 11 show the realism of the simulator. In the case of the Doppler set-up, the heterodyne detection principle was used. (See Appendix B for the theoretical analysis).

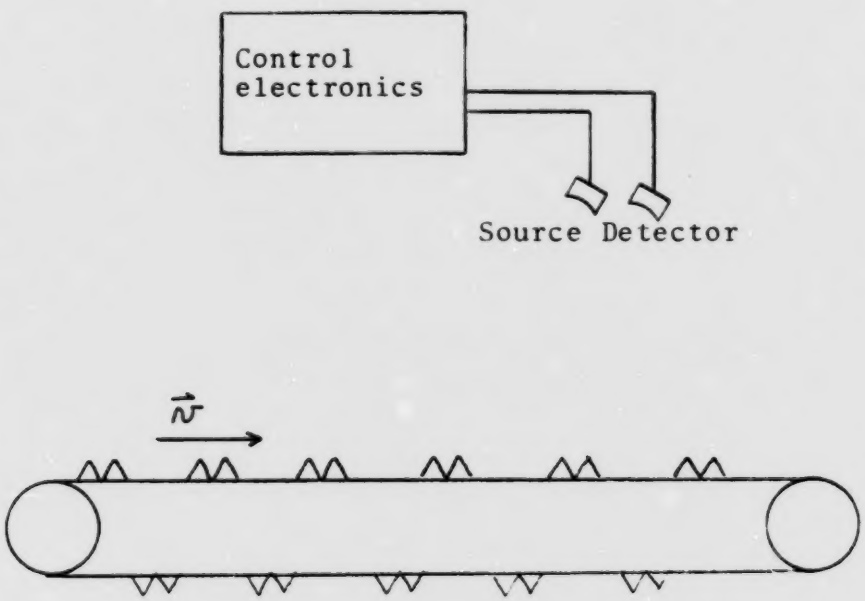


Figure 11: Set-up used to Measure the Speed Using the Doppler Effect

5. RESULTS OF LABORATORY TESTS

5.1 Results on the Interferometer System

The configuration described in Section 4.1 correspond to the optical velocimeter on which the original proposal was based. Unfortunately it was not possible to get a sufficiently strong and stable output. We deduced the difficulties to the very long temporal coherence of the wave train which resulted in multiple parasitic interferences (In the case of the optical system the temporal coherence was only of 30 centimetre).

5.2 Results on the Doppler system

Tables 1 and 2 and their graphical representation (Figures 12a and 12b) give the absolute error and allows the evaluation of the correlation existing between the indicated speed (speed given by the Doppler system) and computed speed .

There is very good correlation between those two values, above 0.999 for both results. The absolute error, if we neglect the extremes, are within one decimeter per second for the November 15th test. For the November 14th test the error was between 10 and 20 cm/sec. The error seem not to depend on the value of the measured speed. From that we conclude that this method can be used to measure speed of less than one meter per second.

Computed Speed	Indicated Speed			Deviation
+ 3.50 m/sec	10.89 sec/10 rev.	=	3.32 m/s	- 0.18 m/s
+ 3.00 m/sec	12.40 sec/10 rev.	=	2.92 m/s	- 0.08 m/s
+ 2.40 m/sec	15.24 sec/10 rev.	=	2.38 m/s	- 0.02 m/s
+ 2.10 m/sec	18.06 sec/10 rev.	=	2.00 m/s	- 0.10 m/s
+ 1.50 m/sec	24.95 sec/10 rev.	=	1.45 m/s	- 0.05 m/s
+ 1.00 m/sec	37.21 sec/10 rev.	=	0.97 m/s	- 0.03 m/s
+ 0.60 m/sec	67.5 sec/10 rev.	=	0.54 m/s	- 0.06 m/s
0.0 m/sec				
- 0.50 m/sec	61.09 sec/10 rev.	=	0.59 m/s	+ 0.03 m/s
- 1.00 m/sec	32.93 sec/10 rev.	=	1.10 m/s	+ 0.10 m/s
- 1.50 m/sec	23.60 sec/10 rev.	=	1.53 m/s	+ 0.03 m/s
- 2.00 m/sec	17.17 sec/10 rev.	=	2.11 m/s	+ 0.11 m/s
- 2.50 m/sec	13.54 sec/10 rev.	=	2.67 m/s	+ 0.17 m/s
- 3.30 m/sec	11.10 sec/10 rev.	=	3.26 m/s	- 0.04 m/s
- 3.60 m/sec	10.22 sec/10 rev.	=	3.54 m/s	- 0.06 m/s
	Belt lenght: 3.62 metres/turn			

Tableau 1: Comparative Test of Computed Speed and Indicated Speed. (Test of November 14, 1983

Computed Speed	Indicated Speed			Deviation
- 4 m/sec	6.34 sec/10 rev.	=	5.71 m/sec	
- 3.5 m/sec	10.41 sec/10 rev.	=	3.50 m/sec	0.00 m/sec
- 3.0 m/sec	11.49 sec/10 rev.	=	3.15 m/sec	+ 0.15 m/sec
- 2.5 m/sec	13.90 sec/10 rev.	=	2.60 m/sec	+ 0.10 m/sec
- 2.0 m/sec	16.52 sec/10 rev.	=	2.19 m/sec	+ 0.19 m/sec
- 1.5 m/sec	21.63 sec/10 rev.	=	1.67 m/sec	+ 0.17 m/sec
- 1.0 m/sec	35.36 sec/10 rev.	=	1.14 m/sec	+ 0.14 m/sec
- 0.5 m/sec	58.68 sec/10 rev.	=	0.62 m/sec	+ 0.12 m/sec
- 0.0 m/sec				
+ 0.5 m/sec	63.49 sec/10 rev.	=	0.57 m/sec	+ 0.07 m/sec
+ 1.0 m/sec	35.31 sec/10 rev.	=	1.01 m/sec	+ 0.01 m/sec
+ 1.5 m/sec	25.41 sec/10 rev.	=	1.42 m/sec	- 0.08 m/sec
+ 2.0 m/sec	17.55 sec/10 rev.	=	2.06 m/sec	+ 0.06 m/sec
+ 2.5 m/sec	14.53 sec/10 rev.	=	2.49 m/sec	- 0.01 m/sec
+ 3.0 m/sec	11.81 sec/10 rev.	=	3.07 m/sec	+ 0.01 m/sec
+ 3.5 m/sec	9.74 sec/10 rev.	=	3.72 m/sec	+ 0.22 m/sec
+ 4.0 m/sec	8.61 sec/10 rev.	=	4.20 m/sec	+ 0.2 m/sec
	Belt lenght: 3.62 meters/turn			

Tableau 2: Comparative test of Computed Speed and Indicated Speed (Test of November 15, 1983)

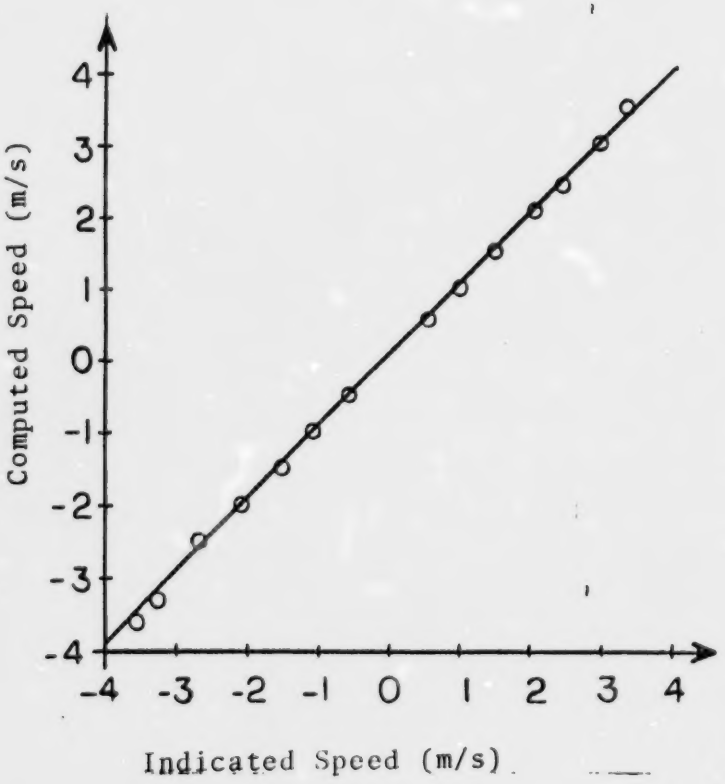


Figure 12a) Graphical Representation of the results Presented in Table 1.

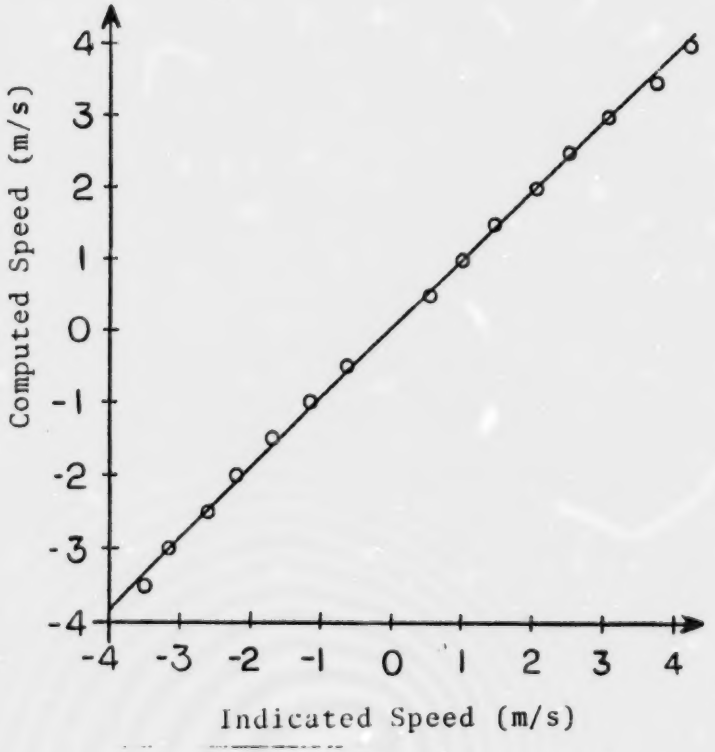


Figure 12b) Graphical Representation of the Results Presented in Table 2.

6. CONSTRUCTION OF PROTOTYPE

6.1 System description

The final version of the speed measuring device include: a high-precision frequency generator, a Bruel-Kjaer amplifier, a source and a piezoelectric receiver build by CP Channel, and a data acquisition and control unit (see Figure 13)

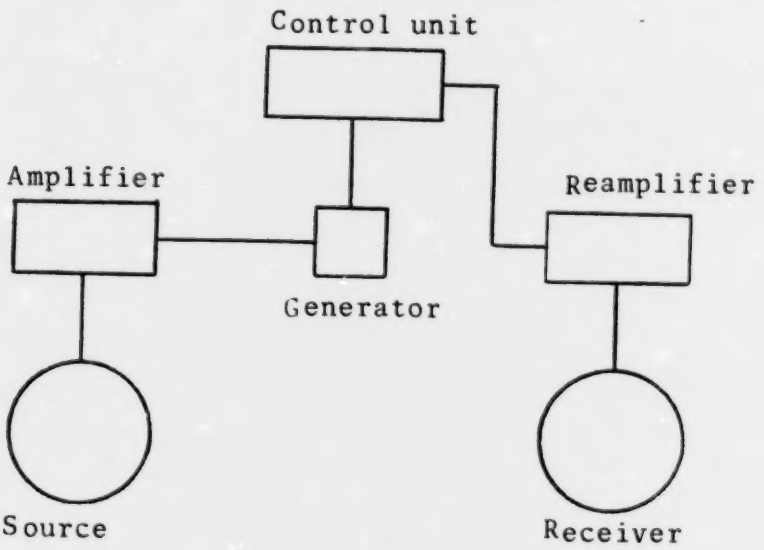


Figure 13: Schematic Representation of the Prototype Velocimeter.

The frequency generator is based on a crystal oscillator operating at 3 MHz. Two different frequencies (37 KHz and 41 KHz) are obtained from the 3 MHz by electronic means. Two pulses of programmed period are generated.

The control unit, by the mean of heterodyne detection with the burst, remove the signal from the noise. This information is then analysed by the microprocessor and the computed speed is displayed.

The transceiver system use two ultrasonic transducers from CP Channel (Model CPAX 40-HE), with resonnant frequency centered on 41 KHz (see Appendix C). They were located at the focal point of a 32.5 cm focal length parabolic mirror. A cylinderical screen was then put around the unit(see Figure 14). The screen provided protection against the wind (low frequency noise) and from vibration originating from the ship structure.

Figure 15 illustrate the physical aspect of the system. The parabolic mirrors with their detectors can be seen at both ends just beside to the power amplifiers. At the center is the control and measuring unit.

The pulse at 14 kHz is amplified and fed into the ultrasonic source. The signal reflected from the observed surface is detected, amplified and fed to the control unit for processing.

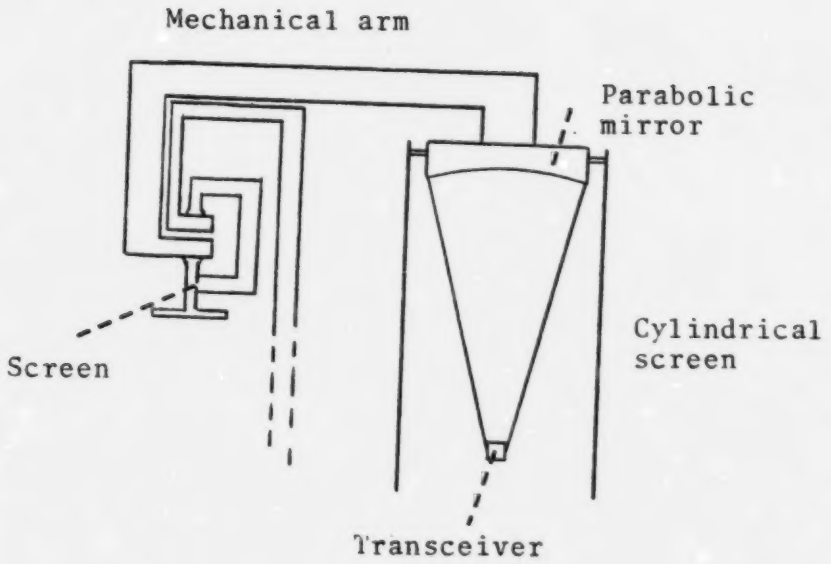


Figure 14: Schematic Representation of the Transceiver

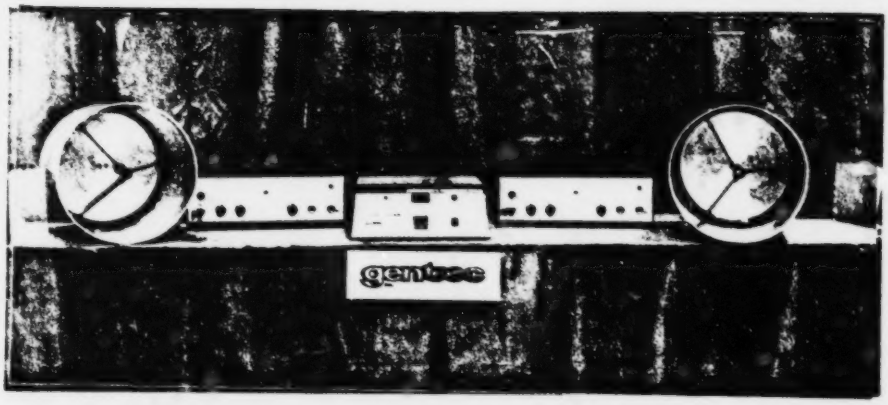


Figure 15: The Velocimeter System

7. RESULTS AND ANALYSIS OF TESTS PERFORMED ON THE ICEBREAKER

7.1 Test of the Prototype on the Des Groseillers Icebreaker.

The tests on the Des Groseillers were performed during the operation of the icebreaker between Quebec City and Trois-Rivières on February 8, 1984. After many trials it was concluded that the best results were obtained when the source was set at an angle of 45^{o} relative to the ice and the receiver was set at the vertical of the aimed point on the ice.

Furthermore, two positions were tried on the ship (see Figure 16). The best results were obtained at the middle rear of the ship. This was mainly due to less wave action at this location than at the front. It was possible to get better reflection at this point.

Some secondary problems were encountered during that trip. It was found that a temperature control system was necessary to warm up the preamplifiers. Also, a better way to fix the system to the ship has to be provided.

The ultrasonic source supplied by Supratec Inc. (see Appendix D) was testee on this ship. It was found that the source from CP Channel performed better in signal-to-noise ratio.

7.2 Analysis of results

During the February 8, 1984 test on the icebreaker Des Groseillers, it was demonstrated that a signal can be obtained from the ultrasonic Doppler velocimeter operating on a ship in an ice field. However the strength of the signal was considerably influenced by the ice surface condition. It was determined that a more powerful ultrasonic source is required to prevent the loss of signal.

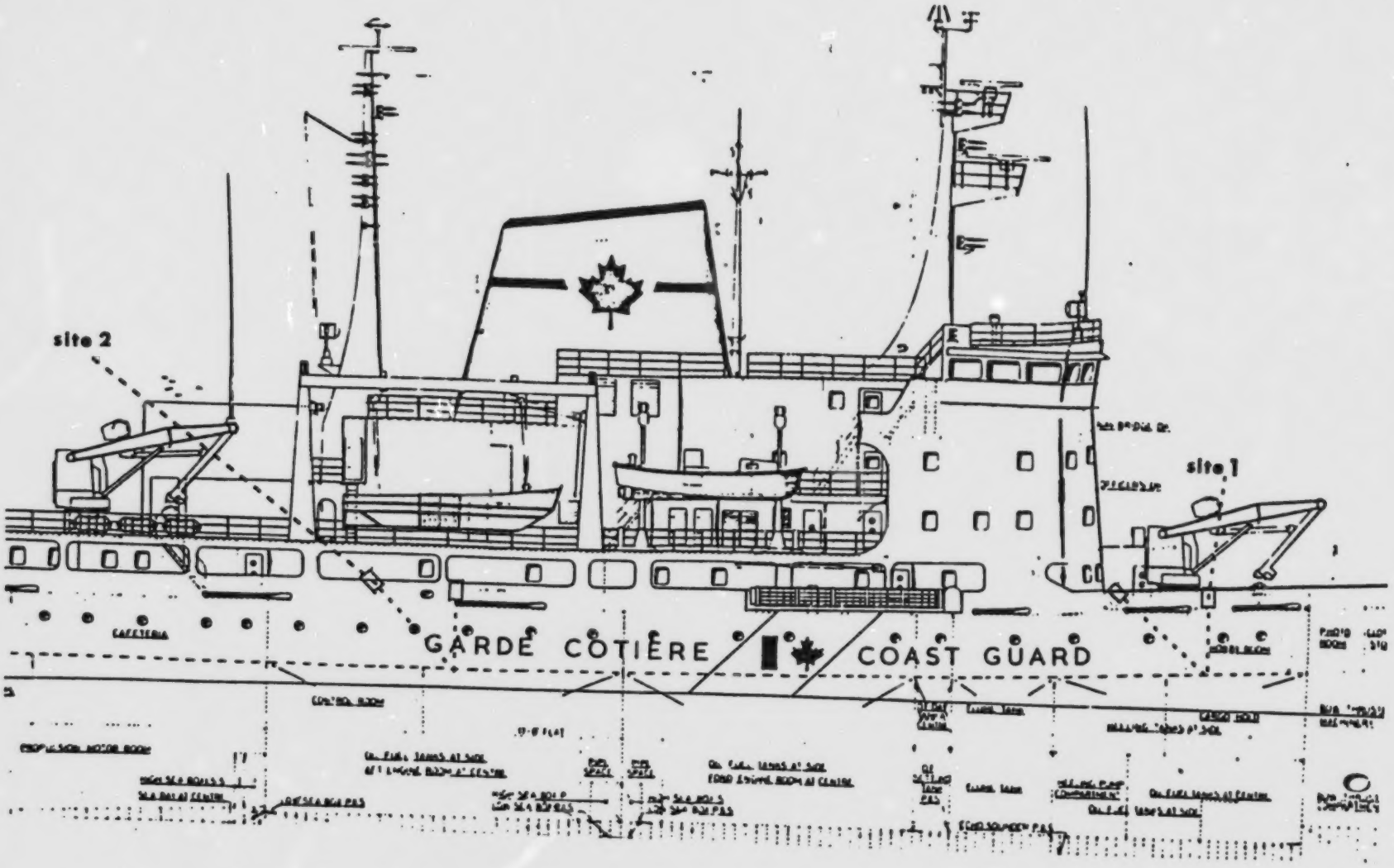


Figure 16. Test Location of the Velocimeter on the Icebreaker

8. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

8.1 Conclusions

The laboratory model worked well under laboratory conditions. Good correlation was obtained between the speed measured by a standard mechanical method and the speed computed by the system. It was possible to trecisely measure speed below on metre per second.

The test of the prototype system on an operating icebreaker revealed some weakness of the system. First the signal is lost in the background noise when the icebreaker encounter a heavy ice field. Secondly the transceiver is affected by severe weather condition usually encountered in winter by an icebreaker. Thirdly mechanical loosening of components was caused by vibration on the icebreaker.

8.2 Recommendations

From the preceding conclusions we recommend a second phase to further develop the velocimeter. The work may then be described as follow:

1. Purchase and adaptation of a high-power source.
2. Modification of the system to receive the new source.
3. Test under low temperature conditions.
4. Installation and test on an icebreaker.

Appendice A

Analyse acoustique
(vélocimètre à ultrasons)

P R O J E T

VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE

Une analyse acoustique

faite pour GENTEC inc.

PAR

SUPRATEC

RÉALISATIONS TECHNOLOGIQUES

Jean-Luc Dion, ing.-Dr

Mesures et contrôles
Électronique
Micro-ordinateurs
Optique
Ultrasonique

3760, rue Montpellier, Trois-Rivières Ouest, Québec G8Y 3P2 Tél.: (819) 376-6000

MARS 1983

TABLE DES MATIÈRES

1-	Description générale du problème	1
2-	Sources d'ultrasons et profil d'émission	2
3-	Champ acoustique devant deux sources	3
4-	Calcul de l'interfrange	6
5-	Vitesse relative navire-glace	8
6-	Exemple de calculs	9
7-	Excitation des sources	9
8-	Correction pour les variations de température	9
9-	Géométrie du système de mesure	10
10-	Effet du vent sur la mesure	11
11-	Orientation des sources	11

* * * * * * *

Projet "VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE"

Une analyse acoustique

Par Jean-Luc Dion, ing.-Dr
Supratec inc.
Mars 1983

1- DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROBLÈME

Sur un navire N (fig. 1) est fixé un dispositif H comportant deux sources d'ultrasons S_1, S_2 émettant des ondes de fréquences f_1, f_2 vers l'eau où flottent des glaces G. Le champ acoustique se déplaçant relativement à la glace, la fraction de l'énergie diffusée par la surface qui est captée en H a une intensité qui est modulée à une fréquence (fréquence de battement) qui est fonction de la vitesse relative glace-navire $v_{gn} = - v_{ng}$.

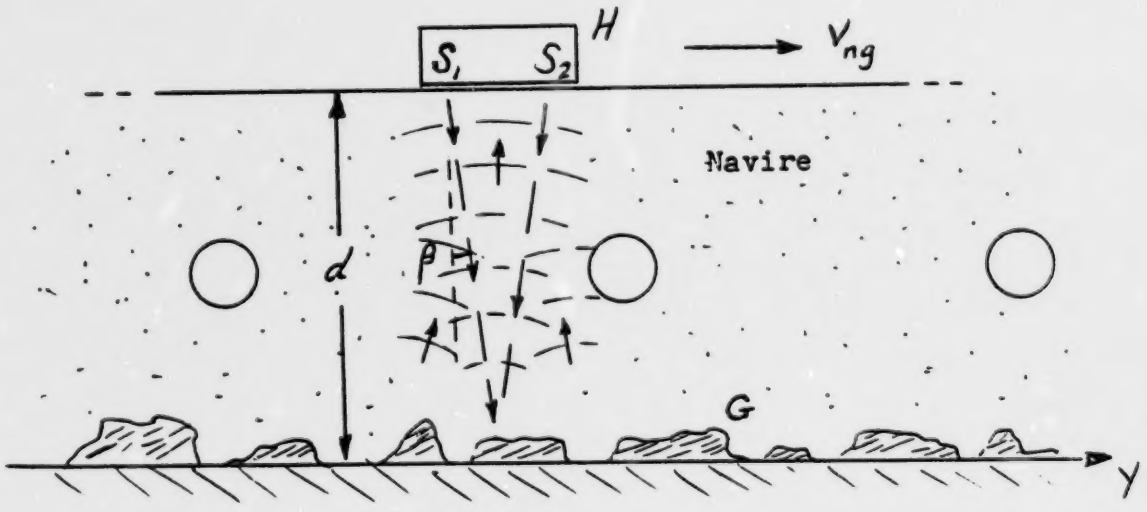


Figure 1

Nous allons déterminer la relation entre cette fréquence f_b et v_{gn} et analyser quelques conditions de fonctionnement.

2- SOURCES D'ULTRASONS ET PROFIL D'ÉMISSION

La fréquence ultrasonore qui semble appropriée à ce système est d'environ 30 kHz. La longueur d'onde correspondante est de 11 mm. Parmi les avantages de ce choix, il y a la faible atténuation et la simplicité de l'équipement: par exemple, des haut-parleurs pour les aigus suffiront probablement comme sources, et on pourra utiliser des amplificateurs pour système de son.

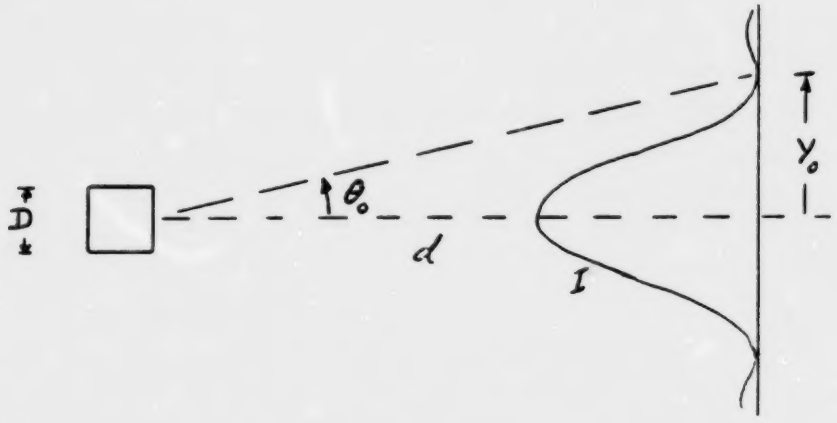


Figure 2 Profil d'émission d'une source ultrasonore considérée comme un piston oscillant, à grande distance.

Le profil d'émission à grande distance d'un piston oscillant de diamètre D est représenté à la fig. 2. La plus grande partie de l'énergie est concentrée dans un cercle de rayon y_o sous-tendant θ_o à la source. On a:

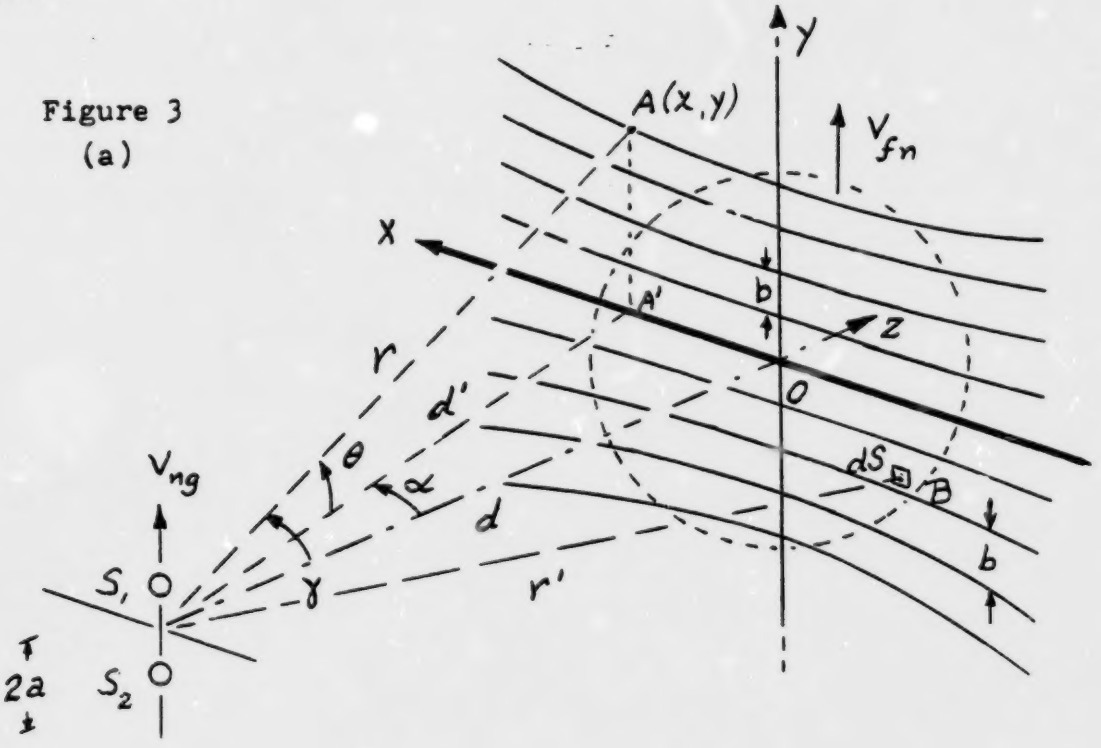
$$\sin \theta_o = \frac{1{,}22\,\lambda}{D} \qquad (1)$$

où λ est la longueur d'onde. Par exemple, à 30 kHz, avec D = 10 cm, on calcule $\theta_o = 7{,}7^\circ$. L'intensité I tombe à la moitié de sa valeur au centre I_m pour $\theta = 3^\circ$ approximativement.

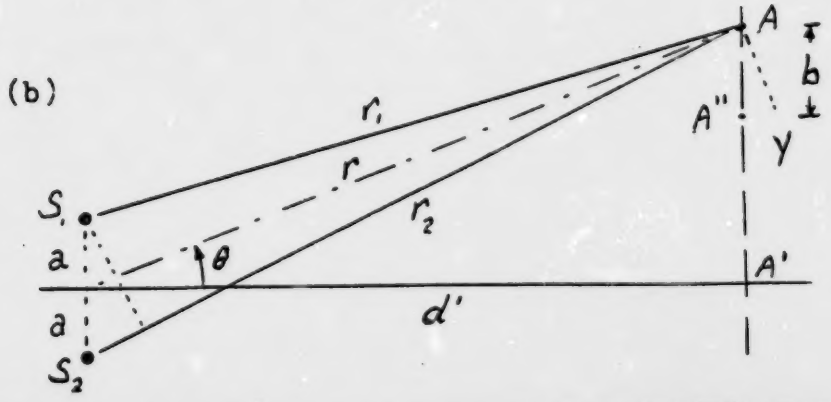
3- CHAMP ACOUSTIQUE DEVANT DEUX SOURCES

Il s'agit ici de trouver une expression du champ acoustique à la surface de l'eau, particulièrement le long de l'axe y parallèle à celui du navire. La fig. 3 définit diverses grandeurs qui interviennent et montre particulièrement l'aspect des franges d'interférence dans le plan x-O-y de la surface perpendiculaire à la direction d'émission et qui coincide pratiquement avec la surface de l'eau. Ces franges sont décrites par des arcs d'hyperboles.

Figure 3
(a)



(b)



Les ondes émises par S_1 et S_2 sont décrites par l'expression de la vitesse acoustique:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_1(r_1) \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) \\ u_2(r_2,t) &= u_2(r_2) \cos(\omega_2 t - k_2 r_2) \end{aligned} \qquad (2)$$

où,

$$\begin{aligned} u_1(r_1) &= u_{1o}\, e^{-\alpha r_1} \\ u_2(r_2) &= u_{2o}\, e^{-\alpha r_2} \end{aligned} \qquad (3)$$

où α est le coefficient d'atténuation dans l'air à cette fréquence. La pulsation $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence. Au voisinage de l'origine O dans le plan x-O-y, les distances aux sources varient peu, de sorte qu'on peut considérer les amplitudes comme pratiquement constantes:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_{1o} \cos(\omega_1 t - k_1 r_1) \\ u_2(r_2,t) &= u_{2o} \cos(\omega_2 t - k_2 r_2) \end{aligned} \qquad (4)$$

La constante de propagation (vecteur d'onde) $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, c étant la vitesse du son dans l'air.

Sous forme complexe, on a:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_{1o}\, e^{-jk_1 r_1}\, e^{j\omega_1 t} \\ u_2(r_2,t) &= u_{2o}\, e^{-jk_2 r_2}\, e^{j\omega_2 t} \end{aligned} \qquad (5)$$

Si $d \gg a$, on a

$$\begin{aligned} r_1 &\simeq r - a \sin\theta \\ r_2 &\simeq r + a \sin\theta \end{aligned} \qquad (6)$$

Avec $r = d/\sin\gamma$

Si les fréquences f_1 et f_2 des sources sont égales, la figure d'interférence est stationnaire. Mais, si les fréquences diffèrent, elle se déplace. En particulier, au voisinage de O le long de O-y (Fig. 3-a), les franges se déplacent à la vitesse v_{fn} par rapport au navire.

Le déphasage des vibrations produites par les sources en A est:

$$\varphi = (\omega_1 t - k_1 r_1) - (\omega_2 t - k_2 r_2)$$

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 r_1 - k_2 r_2)$$

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)r + (k_1 + k_2)a \sin\theta \qquad (7)$$

où $$\sin\theta = y/r = \frac{y/d}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}$$

Alors,

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)d\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2} + \frac{(k_1 + k_2)a(y/d)}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}} \qquad (8)$$

Or, sur une crête ou tout autre point des franges qui se déplacent à la vitesse v_{fn} le déphasage φ est constant. donc $d\varphi = 0$. On en tire la vitesse v_{fn} au point A(x,y). Fixons la variable x et différentions l'expression (8):

$$d\varphi = 0 = (\omega_1 - \omega_2)dt + \left\{-(k_1 - k_2)y/d + (k_1 + k_2)\frac{a}{d}\left[1 - \frac{(y/d)^2}{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}\right]\right\} \times \frac{dy}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}$$

Finalement:

$$v_{fn} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}{(k_1 - k_2)y/d - (k_1 + k_2)(a/d)\left[1 - \frac{(y/d)^2}{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}\right]} \quad (9)$$

La vitesse des franges selon O-y dépend donc de la position dans le plan x-O-y. L'énergie acoustique ré-émise par un point diffuseur B du plan (fig. 3-a) est donc modulée à une fréquence f_b qui dépend de l'interfrange b et de la vitesse de défilement des franges par rapport au point B (glace) qui se déplace lui-même à la vitesse v_{gf} relativement aux franges. On a:

$$f_b = \frac{v_{gf}}{b} \quad (10)$$

Mais $(k_1 - k_2) = (\omega_1 - \omega_2)/c$ est en pratique très inférieur à $(k_1 + k_2) = (\omega_1 + \omega_2)/c$. De plus, si on ne considère que des points près de l'origine O, $y/d \ll 1$ et $x/d \ll 1$, de sorte que l'expression (9) se simplifie considérablement:

$$v_{fn} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)d/a}{k_1 + k_2} = \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}\right)\frac{cd}{a} = \left(\frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}\right)\frac{cd}{a}$$

ou encore:

$$\boxed{v_{fn} = \left(\frac{\Delta f}{f_o}\right)\frac{cd}{2a}} \quad (11)$$

ou $\Delta f = f_1 - f_2$ et $f_o = (f_1 + f_2)/2$, la fréquence moyenne.

4- CALCUL DE L'INTERFRANGE

Une frange d'interférence est le lieu des points où la phase est la même. D'une frange à la suivante, la phase varie de 2π rd. D'après (5), le déphasage en A des vibrations provenant des deux sources à un instant donné est:

$$\Delta\varphi' = (\omega_1 - \omega_2)t_o - (k_1 - k_2)r' + (k_1 + k_2)a \sin\theta'$$

Au point voisin A" (fig. 3-b) vu sous l'angle θ", le déphasage est:

$$\Delta\varphi'' = (\omega_1 - \omega_2)t_o - (k_1 - k_2)r'' + (k_1 + k_2)a \sin\theta''$$

Les points A et A" sont sur deux franges adjacentes où les phases des vibrations résultantes diffèrent de 2π. On a $r' = d'/\cos\theta'$ et $r'' = d'/\cos\theta''$, avec $d' = d\sqrt{1 + (x/d)^2}$. Posons $\Delta\theta = \theta'' - \theta'$, l'angle sous-tendu par l'interfrange b. Ainsi, vu que $\Delta\theta \ll 1$ rd,

$$\cos\theta'' \simeq \cos\theta' \simeq \cos\theta$$

$$\sin\theta'' = \sin(\theta' + \Delta\theta) \simeq \sin\theta' + \Delta\theta\cos\theta$$

Alors,

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi'' - \Delta\varphi' = 2\pi = (k_1 + k_2)\, a \cos\theta\, \Delta\theta$$

D'où,

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{(k_1 + k_2)a\cos\theta} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2)\, a\cos\theta} \qquad (12)$$

ou encore:

$$\Delta\theta = \frac{c}{(f_1 + f_2)a\cos\theta} = \frac{c}{2f_o\, a\cos\theta} \qquad (13)$$

L'interfrange b est donné par

$$b = r\Delta\theta\cos\theta = d'\Delta\theta = d\sqrt{1 + (x/d)^2}\ \Delta\theta$$

D'où:

$$\boxed{b = \frac{cd}{2f_o a}\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}} \qquad (14)$$

Au voisinage de l'origine:

$$\boxed{b = \frac{c\,d}{2\,f_o\,a}} \qquad (15)$$

5- VITESSE RELATIVE NAVIRE-GLACE

Il faut noter que dans cette analyse, on néglige l'effet Doppler, du fait que la vitesse du son est très supérieure à celle du navire par rapport à la glace. De plus, chaque point du plan x-O-y ré-émet des ultrasons dont la fréquence de battement est la même, tant du point de vue d'un observateur sur le navire que d'un autre au repos par rapport à la glace. Si en un point quelconque A(x,y), l'interfrange est plus grand qu'à l'origine, la vitesse (éq. 9) l'est également: c'est essentiel, du fait qu'en tout point A(x,y), un observateur doit percevoir la même fréquence de battement.

Si v_{gn} est la vitesse de la glace relativement au navire, v_{fn} la vitesse des franges relativement au navire et v_{fg} celle des franges relativement à la glace, on a:

$$v_{fg} = v_{fn} - v_{gn}$$

$$v_{gn} = v_{fn} - v_{fg} \qquad (16)$$

A partir des relations (10), (11) et (15), on obtient:

$$\boxed{v_{gn} = \frac{cd}{2af_o} (\Delta f - f_b)} \qquad (17)$$

Remarquons que d'après (9), v_{fn} est négatif (fig. 3-a) quand $f_1 > f_2$. Mais notons que dans (17), on doit prendre la valeur absolue de Δf et que f_b est essentiellement positive.

En pratique, on prendra de préférence $f_2 > f_1$, de sorte qu'une augmentation de fréquence de battement perçue f_b correspond à une avance dans la glace. Pour une plus grande précision, on mesurera la période de battement $T_b = 1/f_b$.

6- EXEMPLE DE CALCULS

Données:

$$c = 330 \text{ m/s} \; ; \quad d = 8 \text{ m} \; ; \quad a = 0,5 \text{ m}$$

$$f_o = 30 \text{ kHz} \; ; \quad \Delta f = 300 \text{ Hz} : \quad f_b = 305 \text{ Hz}$$

L'interfrange est:

$$b = \frac{330 \times 8}{2 \times 300 \times 0,5} = 88 \text{ mm}$$

Vitesse v_{gn}:

$$v_{gn} = b \, (\Delta f - f_b) = 0,088 \, (300 - 305)$$

$$v_{gn} = - 0,44 \text{ m/s}$$

7- EXCITATION DES SOURCES

Les sources doivent produire des trains d'ondes de durée inférieure au temps d'aller-retour à la la surface de l'eau.

$$\tau = 2d/c \qquad (18)$$

Dans l'intervalle suivant, une des deux sources pourra agir comme récepteur. Cette durée pourra être fixe ou auto-adaptable selon la distance de la surface.

L'expression de τ portée dans (17) donne

$$\boxed{v_{gn} = \frac{c^2 \tau}{4af_o} (\Delta f - f_b)} \qquad (19)$$

8- CORRECTION POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE

La vitesse du son dans l'air est donnée par

$$c = \sqrt{\gamma RT/M} \qquad (20)$$

où $\gamma = c_p/c_v$ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air à pression et à volume constants; $\gamma = 1{,}40$ pour l'air;

$R = 8{,}314$ J $K^{-1}mole^{-1}$ est la constante des gaz;
T est la température absolue en kelvins;
M est la masse moléculaire moyenne de l'air: M = 29 g/mole.

Or, à $T_o = 273$ K (0° C), $c = c_o = 331$ m/s dans l'air sec. Comme

$$c^2/c_o^2 = T/T_o,$$

on a

$$c^2 \simeq 400\ T,$$ de sorte que (19) devient

$$\boxed{v_{gn} \simeq \frac{100\tau T}{a f_o}(\Delta f - f_b)} \qquad (21)$$

9- GÉOMÉTRIE DU SYSTÈME DE MESURE

Il faut éviter de capter l'énergie réfléchie directement vers les émetteurs par la surface plane de l'eau, car elle est généralement beaucoup plus élevée que l'énergie diffusée. Si la première domine, vu que sa fréquence de battement est Δf, on mesurera $v_{gn} = 0$. Pour éviter cet inconvénient, les émetteurs seront orientés de quelques degrés vers l'extérieur du navire, de façon que l'énergie diffusée soit dominante au récepteur (fig. 4).

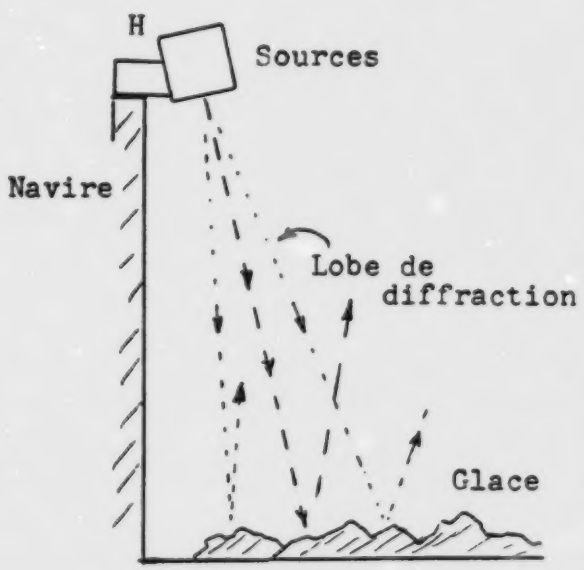


Figure 4

10- EFFET DU VENT SUR LA MESURE

Un vent uniforme qui souffle selon l'axe du navire O-y (fig. 1, 3) n'affecte pas la fréquence de battement perçue f_b.

Par contre, des différences de vitesse du vent le long des parcours r_1 et r_2 entraîne une variation de f_b. En pratique, ces différences de vitesse seront fluctuantes, de sorte qu'il y aura une variation aléatoire δf_b de la fréquence de battement, causant une fluctuation δv_{gn} de la mesure.

Vu la nature aléatoire de ces variations, il devrait suffire de faire la moyenne de f_b sur un intervalle de mesure pour éliminer largement cet effet. Si un intervalle τ ne suffit pas, on fera la moyenne sur plusieurs consécutifs. Ainsi, avec les données vues en 6- plus haut, on calcule $\tau = 0{,}048$ s; avec une fréquence de battement de 300 Hz, il y a donc environ 14 périodes de battement dans l'intervalle τ. La moyenne devrait être alors satisfaisante.

11- ORIENTATION DES SOURCES

Les deux sources doivent être orientées de façon que leurs lobes principaux de diffraction se superposent*; c'est alors que l'intensité de l'énergie diffusée utile est maximale. Avec 2a = 1 mètre et d = 6 mètres, on fera l'inclinaison $\beta = 5^\circ$ environ. Ce réglage ne devrait pas être critique. *Voir page 2

* * * * * * * * * * *

VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE

Etude des conditions de fonctionnement

Jean-Luc Dion, ing.-Dr
SUPRATEC inc.
Septembre 1983

Introduction

Dans une précédente étude (*), nous avons analysé le fonctionnement d'un vélocimètre ultrasonore fonctionnant sur le même principe que l'appareil à laser SOM-10C de GEI-TEC. Dans cette analyse qui est toujours valable, on traitait d'un cas assez idéalisé où 1° l'effet de l'ouverture des faisceaux ultrasonores 2° l'effet de la fluctuation de la hauteur des centres de diffusion étaient négligés. On a supposé en somme que les ondes étaient planes, comme c'est pratiquement le cas pour deux faisceaux laser qui interfèrent.

Or, en pratique, les faisceaux ont une certaine ouverture θ_o définie comme le rayon angulaire du lobe central de diffraction (si l'on suppose une diffraction idéale), comme on le voit à la fig. 1. De plus, les centres de diffusion (les blocs de glace) sont à des hauteurs diverses pouvant atteindre B. Il s'ensuit que la fréquence de battement perçue au récepteur R varie selon l'origine de l'écho dans la zone ABA'. Il y a donc une incertitude à déterminer sur la mesure de la vitesse effective du système (navire) par rapport aux centres de diffusion (glace).

Nous rapportons ici les résultats d'une simulation par ordinateur des conditions rencontrées en pratique, afin de déterminer les limites supérieures d'incertitudes sur les mesures. Les conclusions essentielles sont les suivantes:

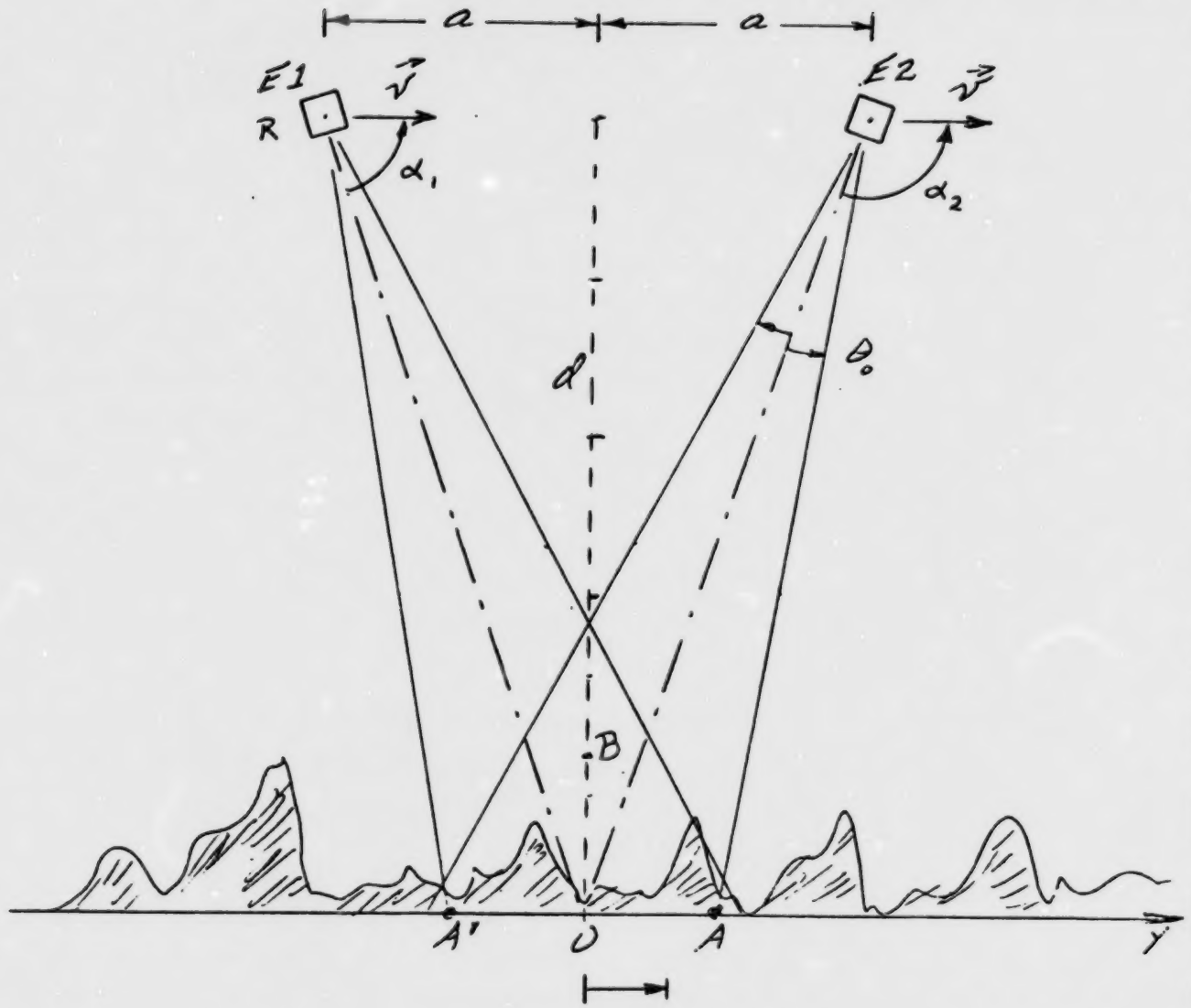


Figure 1

1- Avec le système à deux sources considéré jusqu'ici, l'incertitude pourrait atteindre 30% dans certaines conditions défavorables.

2- L'incertitude diminue avec l'écartement des émetteurs.

3- Il n'y a pas d'avantages à priori dans l'utilisation d'une différence de fréquence élevée $f_1 - f_2$.

4- Il n'y a pas d'avantages à utiliser deux émetteurs. C'est même un inconvénient si l'un des deux sert de récepteur, si leurs bandes passantes sont étroites. En particulier, il n'est alors pas possible d'utiliser une commande automatique de gain.

5- Il semble préférable d'utiliser un seul émetteur donnant un faisceau incliné d'environ 30^0 sur l'horizontale. L'émetteur peut servir de récepteur pendant qu'il est inactif, ou on peut avoir un récepteur adjacent.

6- Dans ce dernier cas, on peut utiliser au récepteur un amplificateur avec commande de gain automatique pour compenser les fluctuations du signal reçu qui peuvent être considérables (plus de 40 dB). Ce signal peut ensuite être combiné à un signal local de fréquence différente, de sorte qu'il soit possible de savoir le signe de la vitesse.

1. MÉTHODE D'ANALYSE

Dans le système de la fig. 1, l'émetteur E1 sert de récepteur R. La vitesse v est la composante horizontale de la vitesse du système par rapport à la glace. L'émetteur E1 a une fréquence f_1 et son écho une fréquence donnée par (*)

$$f_1' = \frac{1 + (v/c) \cos \alpha_1}{1 - (v/c) \cos \alpha_1} f_1 \qquad (1)$$

(*) "Ondes et vibrations", par J.L. Dion (C.E.C., Montréal 1974).

Le signal diffusé venant de S2 a une fréquence

$$f_2' = \frac{1 + (v/c)\cos\alpha_1}{1 - (v/c)\cos\alpha_2} f_2 \qquad (2)$$

où c est la vitesse du son dans l'air (340 m/s à 20°C).

Pour les points sur l'axe O-y:

$$\cos\alpha_1 = \frac{y + a}{\sqrt{d^2 + (y + a)^2}} \qquad (3)$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{y - a}{\sqrt{d^2 + (y - a)^2}} \qquad (4)$$

En posant $y = r\,a$ et $d = s\,a$, on a:

$$G = \cos\alpha_1 = \frac{r + 1}{\sqrt{s^2 + (r + 1)^2}} \qquad (5)$$

$$H = \cos\alpha_2 = \frac{r - 1}{\sqrt{s^2 + (r - 1)^2}} \qquad (6)$$

Si $f_o = (f_1 + f_2)/2$ et $\Delta f = f_1 - f_2$, on obtient

$$f_1' = \frac{(1 + Gv/c)}{(1 - Gv/c)} (f_o + \Delta f) \qquad (7)$$

$$f_2' = \frac{(1 + Gv/c)}{(1 - Hv/c)} (f_o - \Delta f) \qquad (8)$$

Les résultats obtenus se résument dans la figure 2. Les calculs ont été faits pour une fréquence moyenne f_o = 34 kHz et Δf = 500 Hz (f_1 = 33,5 kHz, f_2 = 34,5 kHz). On peut lire la fréquence de battement mesurée en fonction de la vitesse pour diverses valeurs de l'inclinaison des faisceaux ultrasonores par rapport à la verticale ($\alpha_1 = -\alpha_2$). Supposant $\alpha = 30^o$ et une ouverture de faisceau de 10^o, on voit (point A) qu'une fréquence mesurée de 1460 (f_b) peut correspondre à des vitesses de 2,45 à 3,15 m/s dans le pire des cas; ce qui correspond à une incertitude de 12,5%. Par contre, pour $\alpha = 60^o$, cette incertitude devient 31%. Dans ces conditions, il y a nettement avantage à utiliser des transducteurs fortement inclinés sur la verticale.

Toutefois, il n'y a pas de véritable avantage à utiliser un deuxième transducteur tel que E2. Il a été introduit à la suite d'une transposition de la technique optique au domaine acoustique. En optique, les deux faisceaux laser (subdivision d'un seul) sont requis pour produire un signal de battement; c'est la seule possibilité. Mais dans le domaine acoustique, le signal de référence peut être combiné électroniquement à l'écho provenant d'un seul émetteur. Un avantage notable est alors que le signal reçu peut être amplifié par un amplificateur à gain commandé par le signal, avant addition au signal de référence. Ceci devrait permettre une évaluation plus précise de la fréquence de battement en réduisant considérablement le bruit dû aux fluctuations de niveau de l'écho.

Nous avons fait des calculs permettant de comparer les deux techniques. Dans le système utilisant un seul transducteur (Fig. 3), la fréquence de l'écho est donnée par

$$f = \frac{1 + (v/c)\cos\alpha}{1 - (v/c)\cos\alpha} f_o \qquad (c)$$

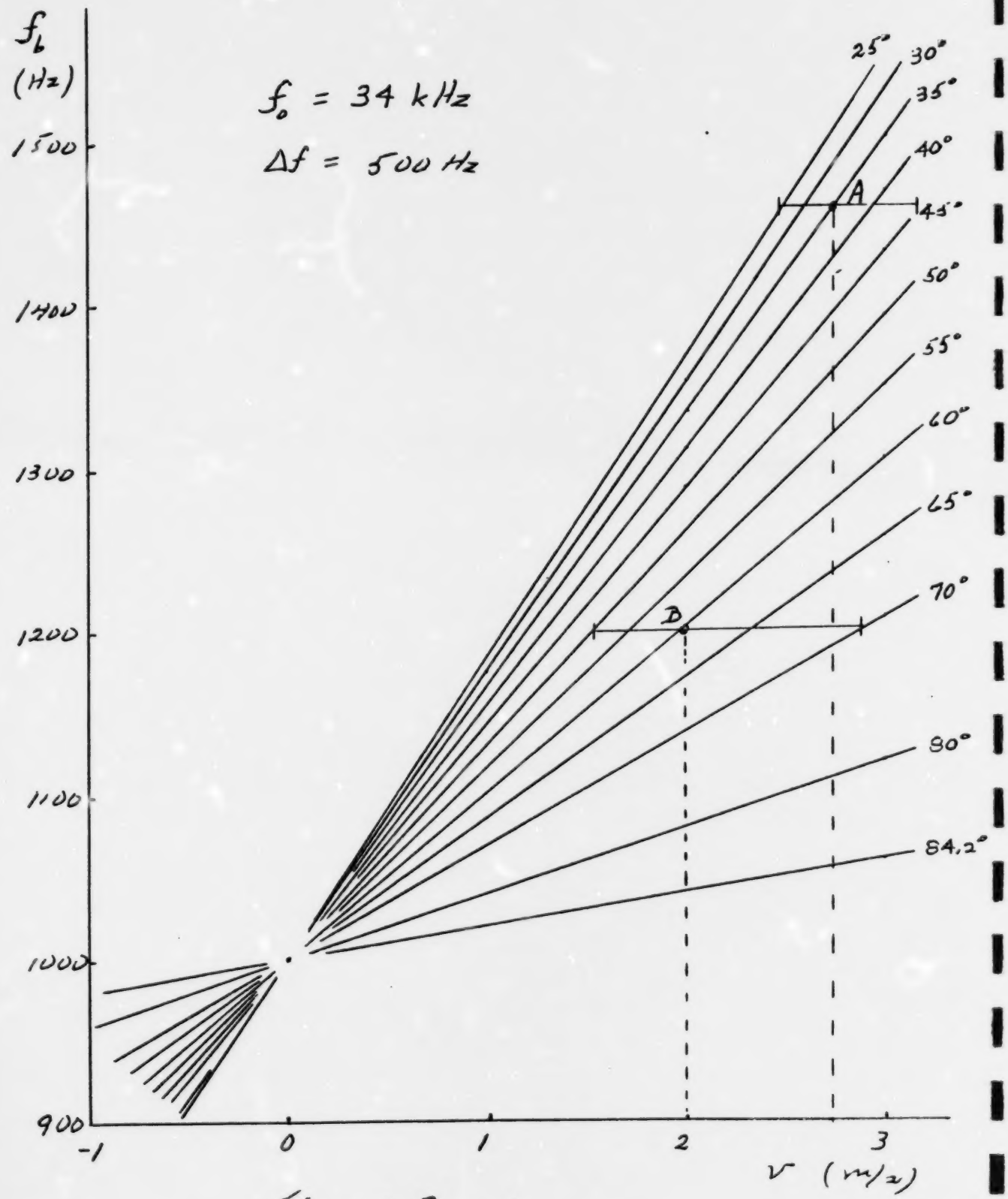
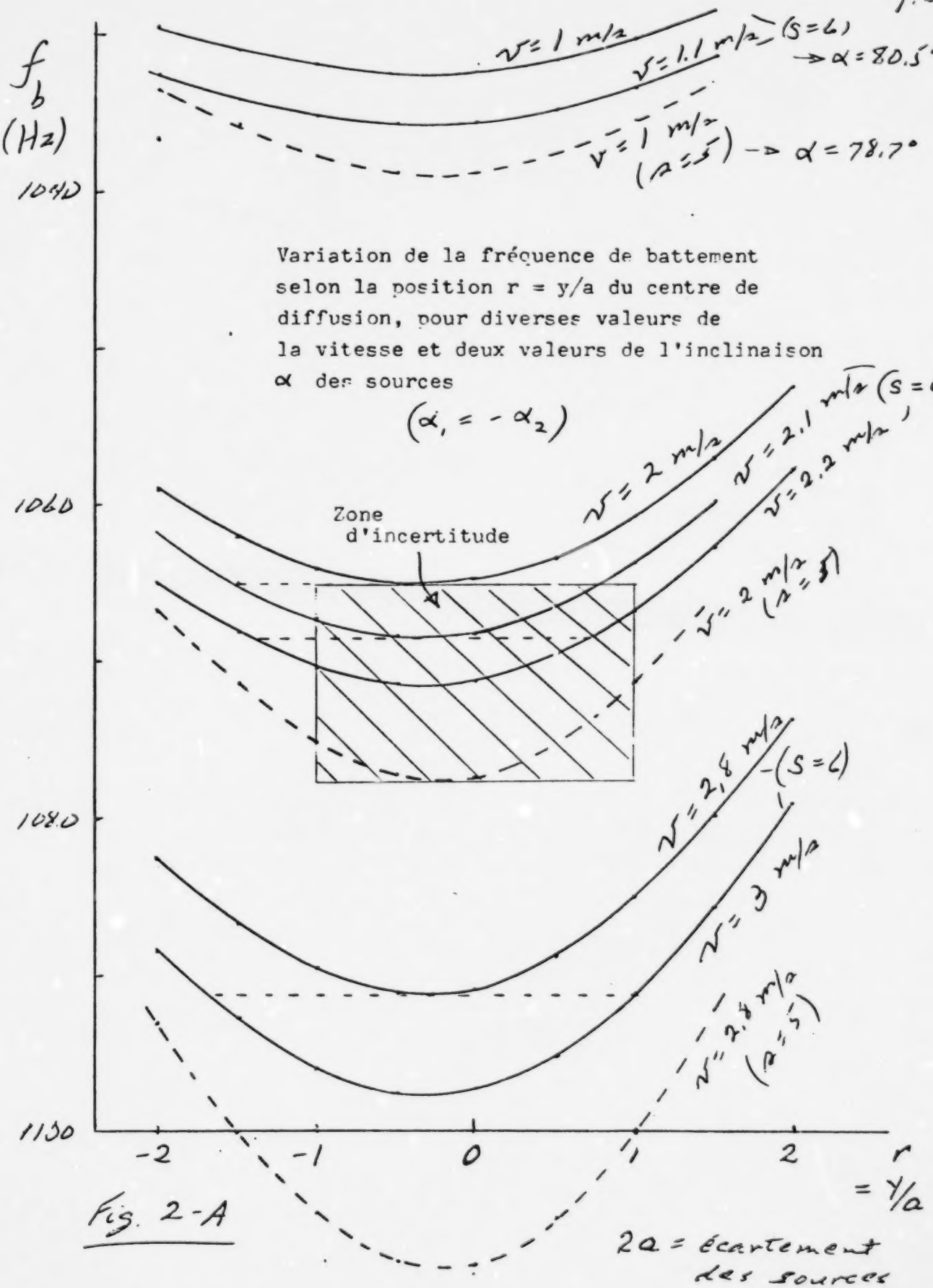

f_b (Hz)
f_o = 34 kHz
Δf = 500 Hz
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
-1
0
1
2
3
v (m/s)
25°
30°
35°
40°
45°
50°
55°
60°
65°
70°
80°
84.2°
A
B

FIGURE 2



Variation de la fréquence de battement selon la position r = y/a du centre de diffusion, pour diverses valeurs de la vitesse et deux valeurs de l'inclinaison α des sources

$(\alpha_1 = -\alpha_2)$

Fig. 2-A

2a = écartement des sources

On peut alors soustraire f de f_o pour obtenir une fréquence de battement

$$f_b = f - f_o$$

La figure 4 montre cette fréquence f_b en fonction de la vitesse v pour différentes valeurs d'inclinaison du faisceau sur l'horizontale. On voit que pour $\alpha = 30^o$, la pire incertitude probable est de 10,3% que l'on peut comparer à 12,5% avec la technique précédente. Considérant l'utilisation de la commande de gain automatique et une ouverture de faisceau qui peut possiblement être de moins de 5^o, on peut envisager une incertitude possible de 5% seulement avec cette deuxième méthode.

La fréquence soustraite de celle de l'écho peut être f'_o, différente de f_o, de façon à avoir $f_b > 0$ quand v = 0. Il est alors possible de déterminer le signe de la vitesse, comme avec la méthode précédente utilisant deux émetteurs. Par exemple, avec f'_o = 33 kHz (f_o = 34 kHz), la fréquence de battement passe de 825 à 1 kHz pour v variant de -1 m/s à 0, et passe de 1 kHz à 1,5 kHz pour v variant de 0 à 3 m/s à peu près.

Dans tous les cas, il est sous-entendu que l'émission est pulsée, de façon que l'émetteur n'interfère pas avec le récepteur. La durée maximale des trains d'ondes doit être égale au temps d'aller-retour du signal.

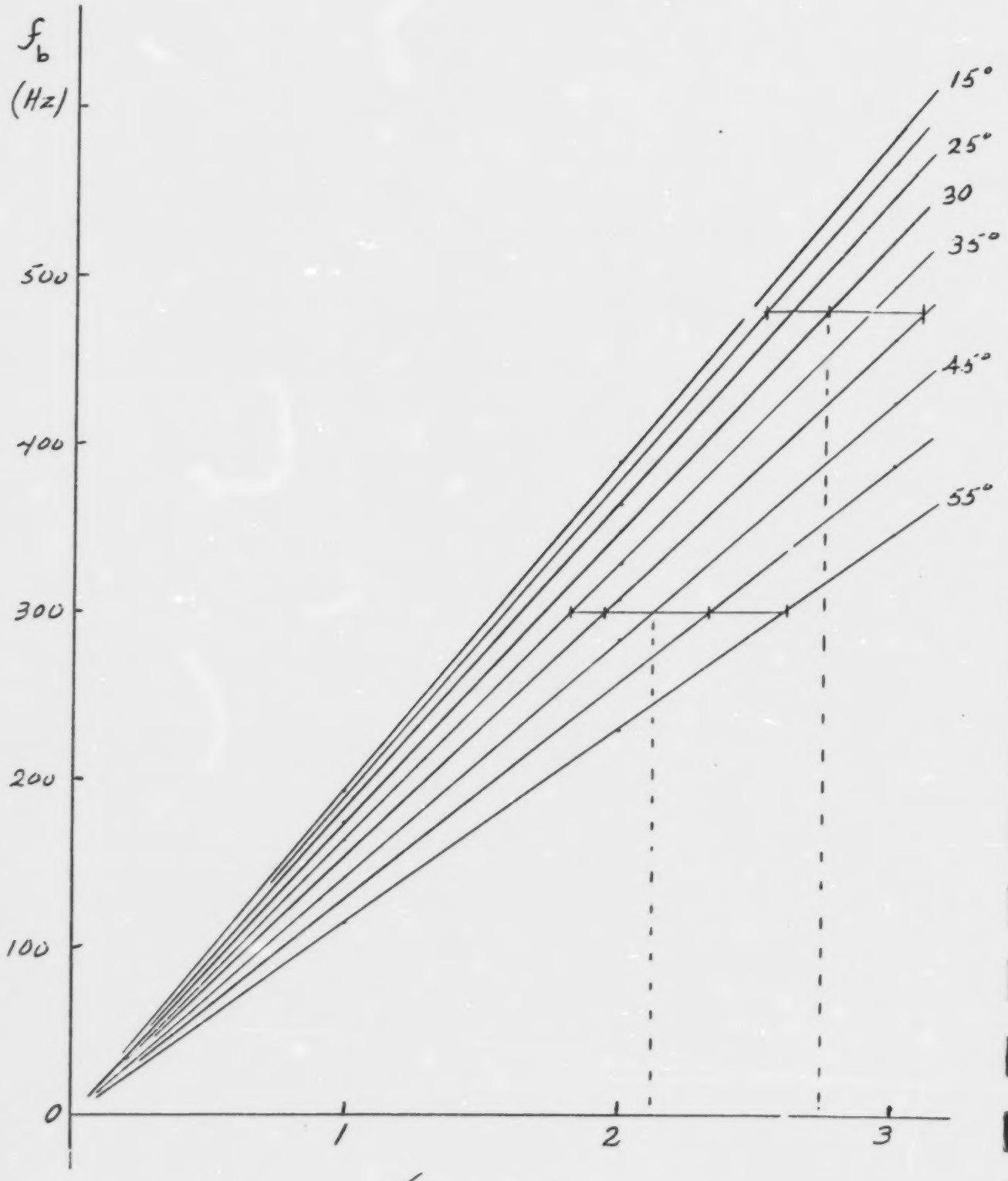


Figure 4

CONCLUSIONS

Nous avons vérifié que si l'on ne tient pas compte de l'ouverture des faisceaux, la présente analyse donne les mêmes résultats dans les mêmes conditions: à la fig. 2-A, v = 1 m/s, avec r = 0 (Diffusion en O, fig. 1) et s = 6 (α = 80,6°), on lit 1032,4 Hz = f_b . L'application de la formule (17) du rapport de mars donne f_b = 1033,3 Hz.

Toutefois, si l'on tient compte de l'ouverture des faisceaux et des variations de hauteur des centres de diffusion, l'incertitude peut atteindre 30% quand les faisceaux sont faiblement inclinés sur la verticale. On constate que la précision s'améliore avec l'écartement des émetteurs.

Il n'y a pas d'avantage à utiliser deux émetteurs. C'est même un inconvénient, particulièrement si leurs bandes passantes sont étroites et s'ils doivent fonctionner à des fréquences différentes (NOTE: le Δf dans la présente étude est la moitié de celui défini dans la précédente). De plus, les fluctuations de niveau de l'écho se superposent au battement, ce qui doit entraîner de plus grandes erreurs.

Il semble préférable de n'utiliser qu'un seul émetteur incliné d'environ 30° sur l'horizontale. Il peut servir de récepteur quand il est inactif, ou on peut avoir un récepteur distinct.

Il doit y avoir avantage à utiliser au récepteur un amplificateur avec commande de gain automatique pour comprimer les fluctuations de niveau des échos.

On peut alors faire la différence de fréquence de ce signal et d'un signal de référence dont la fréquence est de 1 ou 2 kHz inférieure à celle de l'émetteur.

On peut alors faire la différence de fréquence de ce signal et d'un signal de référence dont la fréquence est de 1 ou 2 kHz inférieure à celle de l'émetteur.

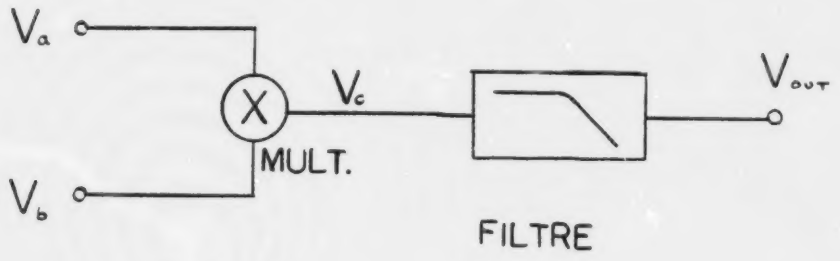
Dans ces conditions, il devient possible de considérer une précision supérieure à 10⁻⁴ sur la mesure des vitesses.

* * * * * * * * * * * * *

Appendice B

Théorie de la détection hétérodyne

THEORIE DE LA DETECTION HETERODYNE SIMULEE



$$V_a = A\cos(2\pi f_a t)$$

$$V_b = B\cos(2\pi f_b t)$$

$$V_c = \frac{V_a V_b}{10} = \frac{AB}{10} \times \cos(2\pi f_a t) \times \cos(2\pi f_b t)$$

$$= \frac{AB}{20} \times (\cos(2\pi(f_a - f_b) + \cos(2\pi(f_a + f_b)))$$

SI UNE COMPOSANTE DC EST ADDITIONNEE A L'UNE DES ENTREES:

$$V_c = \frac{[A\cos(2\pi f_a t) + A_{DC}]B\cos(2\pi f_b t)}{10}$$

$$V_c = \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a - f_c)t) + \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a + f_b)t) + \frac{A_{DC}B}{10}\cos(2\pi f_b t)$$

SI LA COMPOSANTE DC SE TROUVE SUR LES 2 ENTREES:

$$V_c = \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a - f_b)t) + \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a + f_b)t) + \frac{A_{DC}B}{10}\cos(2\pi f_b t)$$

$$+ \frac{AB_{DC}}{10}\cos(2\pi f_a t)$$

Appendice C

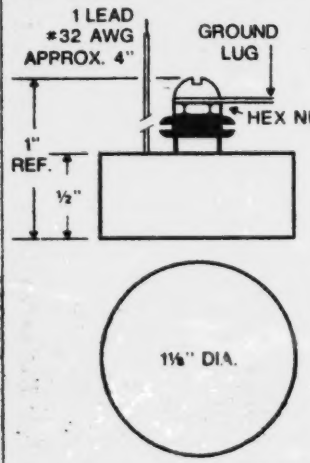
Les détecteurs-émetteurs CP Channel

CHANNEL PRODUCTS
Air Transducers

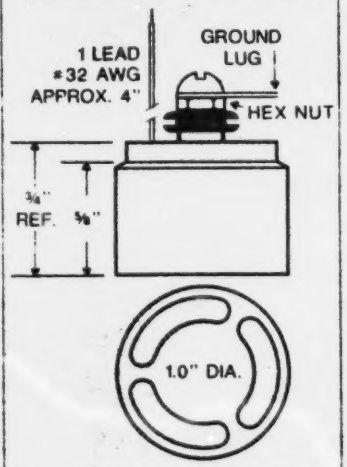
Typical Specifications (Nominal values except where noted otherwise)

NEW CPAX AIR TRANS-DUCERS

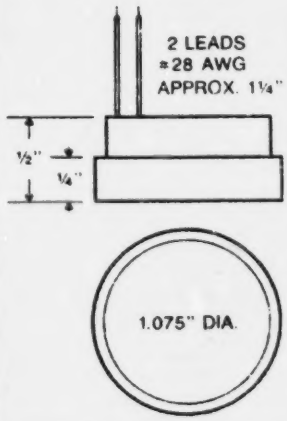
Model CPAX 40* Ultrasonic Air Transducer



Model CPAX 40-HE* Ultrasonic Air Transducer



Model CPAX 180 High Frequency Air Transducer



		Model CPAX 40*	Model CPAX 40-HE*	Model CPAX 180
Frequency of Resonance (Minimum Impedance)	f_m	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	180 ± 3 kHz
Frequency of Anti-Resonance (Max. Impedance)	f_n	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	220 kHz
Ratio	f_n/f_m	1.015	1.015	1.20

Transmitter (T) f_m and Receiver (R) f_n can be matched as follows: (CPAX 40 and CPAX 40-HE)

Code	Center Frequency (±0.25 kHz)	Code	Center Frequency (±0.25 kHz)
A	37.0	F	39.5
B	37.5	G	40.0
C	38.0	H	40.5
D	38.5	I	41.0
E	39.0		

Capacitance	Ce	1.2 nF	1.2 nF	125 pF
Impedance	At f_m	1.0 k ohms	1.0 k ohms	500 ohms
	At f_n	6.0 k ohms	10.0 k ohms	200 k ohms
Beamwidth (10 dB)		45-50° (plus side lobes)	20-25° (plus side lobes)	Approx. 10° (plus side lobes)
Bandwidth	T	1% untuned	1% untuned	2% untuned
	R	1% open circuit	1% open circuit	2% open circuit
	R	2.5% with 10 k ohms load	2.5% with 10 k ohms load	
Sensitivities	T	4 μ bars/volt @ 1 foot	10 μ bars/volt @ 1 foot	2 μ bars/volt @ 1 foot
	R	1.5 mv/μ bars (open circuit)	5 mv/μ bars (open circuit)	0.2 mv/μ bars (open circuit)
	R	0.75 mv/μ bars with 10 k ohms load	2 mv/μ bars with 10 kohms load	
Drive Voltage		25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)	25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)	25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)

*Available in lower frequencies to approximately 23 kHz with changes in specifications

Air Transducers

Model CPAX 40*

Channel Product CPAX 40 is an ultrasonic transducer for use in an air medium. The radiating face is a metallic diaphragm. The unit is basically sealed.

It is recommended that for operation as a transmitter the unit be operated at or near the minimum impedance frequency (f_m). As a receiver it should be operated at or near the maximum impedance frequency (f_n). As an operating pair, maximum sensitivity is achieved with the transmitter f_m equal to the receiver f_n. These frequencies are affected by mounting and circuit conditions, thus care must be exercised for a proper selection.

Model CPAX 40-HE*

Channel Products CPAX 40-HE is a high efficiency, ultrasonic transducer for use in an air medium. The radiating face is a metallic diaphragm. The unit is basically sealed.

On-axis sensitivity has been increased by means of an optimally positioned front horn. This feature has also resulted in the increase in directivity required for many applications.

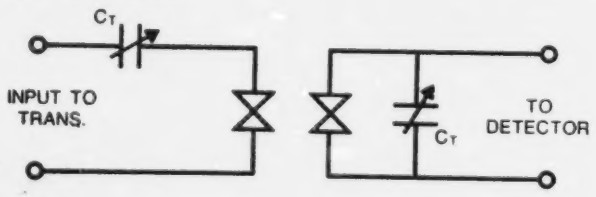
It is recommended that for operation as a transmitter the unit be operated at or near the minimum impedance frequency (f_m). As a receiver, it should be operated at or near maximum impedance frequency (f_n). As an operating pair, maximum sensitivity is achieved with the transmitter f_m equal to the receiver f_n. These frequencies are affected by mounting and circuit conditions, thus care must be exercised for a proper selection.

Model CPAX 180

Channel Products CPAX 180 is a high frequency transducer for use in an air medium. The radiating face is a phenolic diaphragm which is driven by a piezoelectric ceramic operating in a longitudinal mode.

This unit is for operation at short range because, at this frequency, attenuation in air may approach 3 dB/foot. It has been effectively utilized in proximity detection at a range of up to two feet.

Typical air transducers are best matched with the receiver tuned to anti resonance (frequency of maximum impedance) and the transmitter tuned to resonance (frequency of minimum impedance). This unit is designed only for resonance operation. However, by series tuning the "transmitter" with a capacitance in the range 100 to 150 pf and shunt tuning the "receiver" with a comparable value of capacitance, transmitting and receiving frequencies are "pulled" towards each other. Experimental effort is required to optimize such matching (since mounting, level and other circuit conditions also influence the operating frequency). An alternate approach to matching two CPAX 180's for transmitting and receiving would be to load the receiver with approximately 500 ohms. Again, experimental effort is suggested to determine the optimum load. Tuning with a load C_T is illustrated below:



Available in lower frequencies to approximately 23 kHz with changes in specifications.

Name _____ Title _____

Company _____

Address _____

City _____ State _____ Zip _____

☐ I am interested in Channel CPAX: ☐ Price ☐ Delivery

I ☐ am ☐ am not planning to purchase this type of product at this time

I anticipate this purchase ☐ 1-6 months ☐ over 6 months

Potential yearly quantity required: _____

☐ Please send a sample of model number CPAX - _____

Possible application and/or question: _____

_____

☐ Please have a Channel Products technical representative contact me at

(telephone) _____ ext _____

Mail to:

CHANNEL PRODUCTS INCORPORATED
7100 Wilson Mills Road • Chesterland, Ohio 44026 • 216 423 0113

Appendice D

Les détecteurs-émetteurs de Supratec

SUPRATEC INC.

Mesures et contrôles
Électronique
Micro-ordinateurs
Optique
Ultrasonique

RÉALISATIONS TECHNOLOGIQUES 3760, rue Montpellier, Trois-Rivières Ouest, Québec G8Y 3P2 Tél.: (819) 376-6000

TRANSDUCTEUR ULTRASONORE PIÉZOÉLECTRIQUE

Description abrégée

(Voir figure 0)

Fréquence de résonance:	35,2 kHz
Elément actif:	céramique piézoélectrique (Channel 5400) Diamètre: 76 mm Epaisseur: 12,8 mm
Résonateur:	céramique avec assemblages de blocs d'aluminium cimentés de chaque côté. Résonance fondamentale à 35,2 kHz.
Transformateurs d'impédance acoustique:	un disque d'acrylique lambda/4 ciménté aux blocs d'aluminium, plus un disque de mousse de polystyrène bleu lambda/4 cimenté à l'acrylique.
Impédance électrique:	1760 $\angle -40^{\circ}$ ohms à 35,2 kHz.
Tension maximale recommandée:	125 V efficaces à 35,2 kHz en mode continu. 175 V efficaces à 35,2 kHz en mode pulsé à 50%.
Masse:	environ 3 kg
Dimensions:	hauteur: 170 mm diamètre: 115 mm

* * * * * * * * *

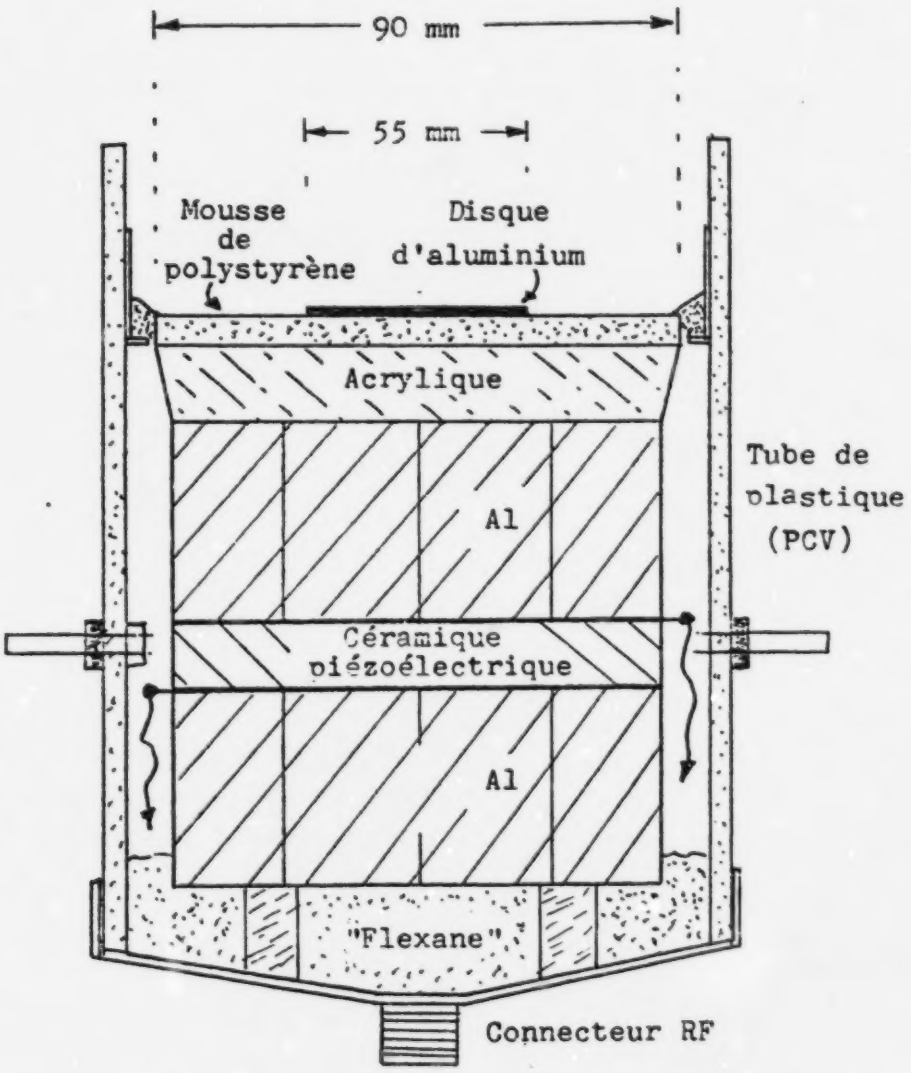


Figure 0 Coupe schématique du transducteur
La fixation par le milieu n'est pas montrée.

SUPRATEC INC.

MESURES SUR LE TRANSDUCTEUR

Appareils utilisés :

- Sonomètre Bruel & Kjaer modèle 2209
- Microphone B & K type 4133
- Filtre d'octave type 1613
- Amplificateur Krohn Hite Amp. 06
- Oscilloscope kikusui Os2 54
- Sondes 10:1 kikusui

Conditions de mesure

Réponse en fréquence:

(Fig. 1 et 2)

- filtre d'octave sur 31.5Khz
- sonomètre sur réponse rapide
- tension appliquée au transducteur 80V c-c
- table traçante HP Exy- 02
- distance entre le sonomètre et le transducteur = 1.6 mètre
- sonomètre sur l'échelle de 80 dB

Patron de rayonnement:

- filtre d'octave sur 31.5Khz
- sonomètre sur réponse rapide
- tension appliquée au transducteur 56V c-c
- distance entre le sonomètre et le transducteur = 1m.

Figures de rayonnement

Figure 3 :

Tension appliquée : 56 V c-c
Fréquence : 35.19 Khz
Distance : 1 mètre

Données:

angle	valeur lue au sonomètre
0	90 dB
2.5	85 dB
5.0	80 dB
7.5	90 dB
10	90 dB
15	81 dB
18	62 dB
20	75 dB
25	72 dB
30	62 dB

Figure 4

Tension appliquée : 56 V c-c
Fréquence : 35.19 Khz
Distance : 1 mètre

Données:

angle	valeur lue au sonomètre
0	88.5 dB
2.5	84 dB
5	70 dB
7.5	85.5 dB
10	76 dB
15	64 dB
20	77.5 dB
25	68 dB
30	62 dB

Figure 3: réponse prise sans disque d'aluminium collé au centre de la face du transducteur

Figure 4: : réponse prise avec le disque d'aluminium collé au centre de la face du transducteur

Réponse Impulsionnelle

But: Mesurer le temps de montée et le temps de descente du transducteur en réponse à un signal pulsé de 35.19 Khz

Résultats:

temps de montée de 10% 'a 90% = 600 µsec.
temps de descente de 90% 'a 10%= 600 µsec.

Conditions de mesure:

-Sonomètre B&K 2209 sur échelle de 80 dB
-Tension appliquée = 80 V c-c
-Fréquence = 35.19 Khz
-Filtre d'octave sur 31.5 Khz
-Distance entre la face du transducteur et le microphone = 1mètre
-Tension lue sur ocsilloscope Kikusui
-Sonomètre sur réponse rapide
-Largeur des impulsions = 5msec.
-Période =10 msec.

Impédance mesurée à 35.19 Khz

module = 1760 ohms argument = -40 degrés (capacitif)
résistance série équivalente = 1360 ohms
capacité série équivalente = 3.98 nF

Transducteur utilisé comme récepteur

Distance entre le récepteur et l'émetteur = 1 mètre
Fréquence utilisée = 35.19 Khz
Puissance du signal sonore incident = 82 dB
Signal mesuré au sonomètre avec filtre
Tension lue à l'oscilloscope Kikusui = 30 mV
Impédance d'entrée de l'oscilloscope = 1Mohm

RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Transducteur complet sans disque sur la face avant.

Sonomètre B & K 2209
Micro B & K 4133
Filtre d'octave B & K 1613
f_o = 31,5 kHz
Distance: 1,6 m entre la face du transducteur et le micro
Tension appliquée: 80 $V_{c.c.}$

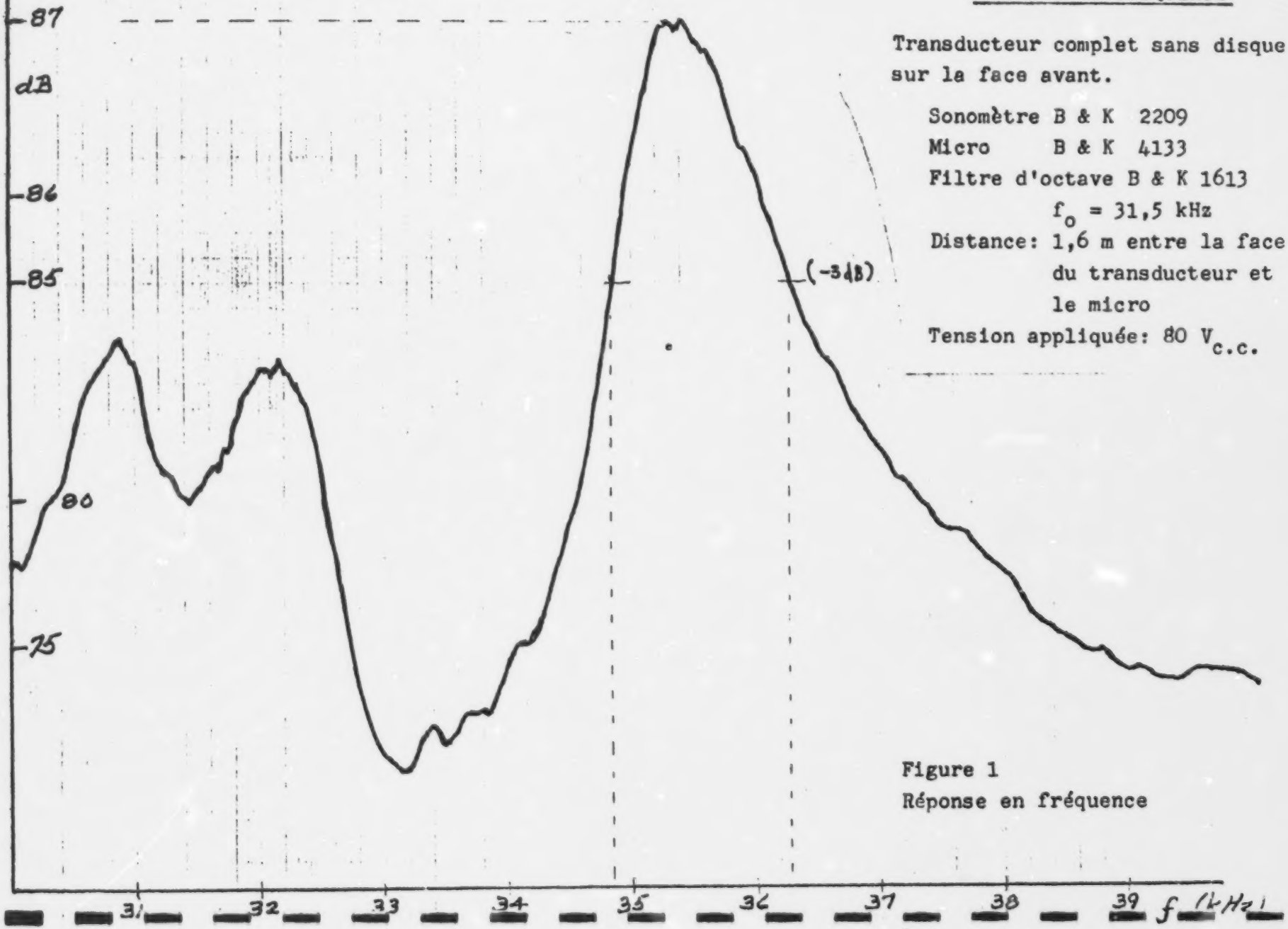
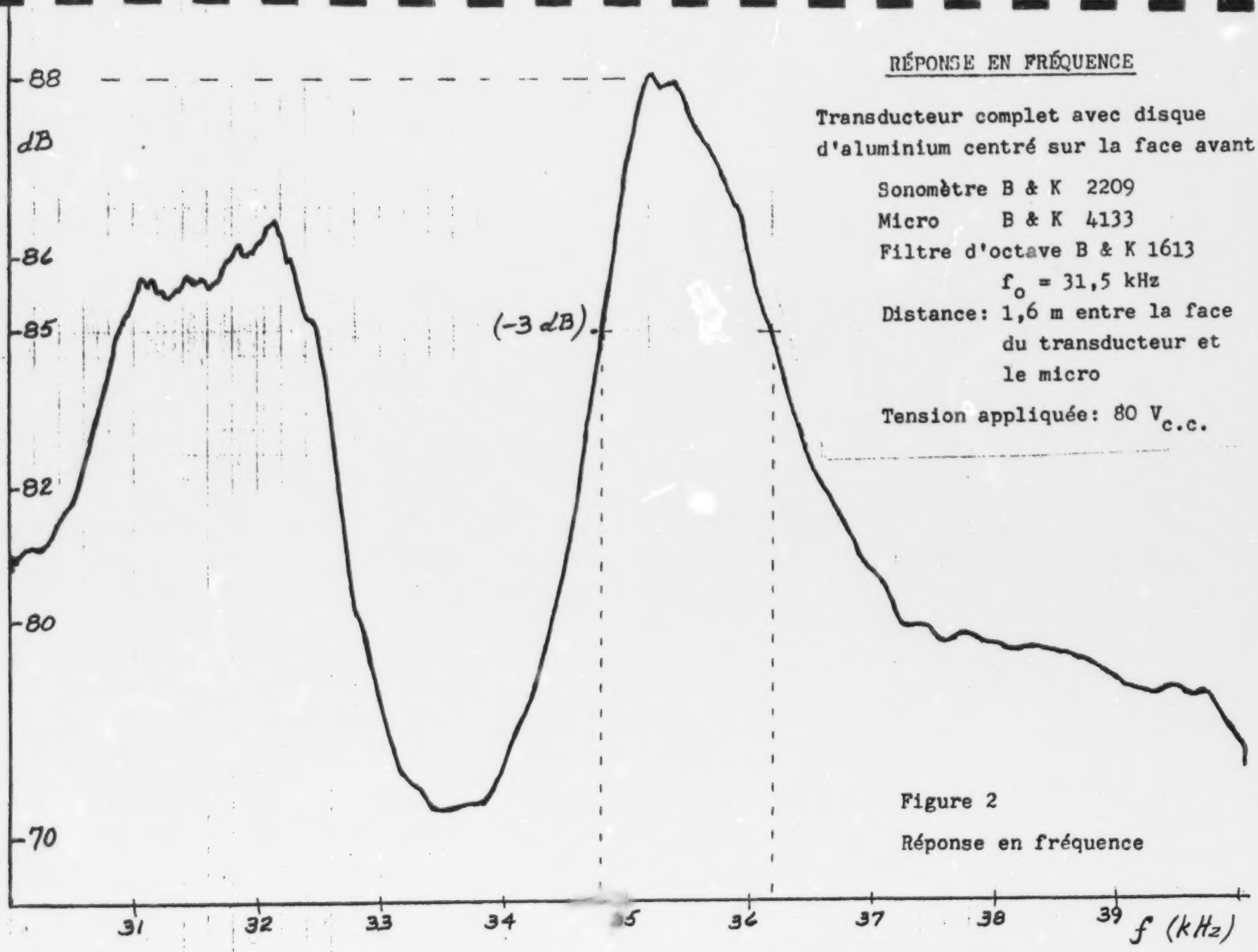


Figure 1
Réponse en fréquence



RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Transducteur complet avec disque d'aluminium centré sur la face avant.

Sonomètre B & K 2209
Micro B & K 4133
Filtre d'octave B & K 1613
f_o = 31,5 kHz
Distance: 1,6 m entre la face du transducteur et le micro

Tension appliquée: 80 $V_{c.c.}$

Figure 2

Réponse en fréquence

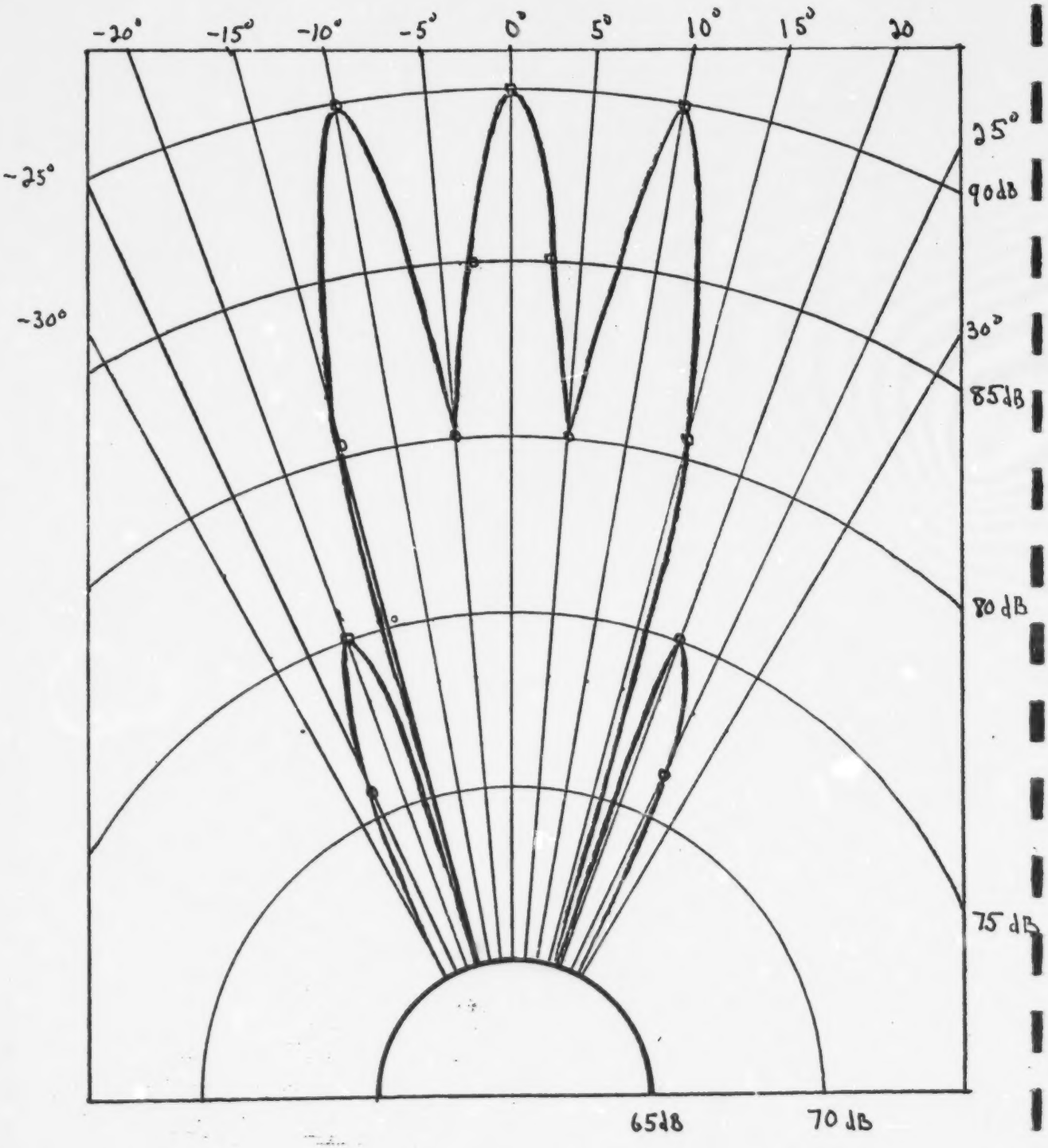


Figure 3 Diagramme de radiation
Transducteur sans disque à l'avant

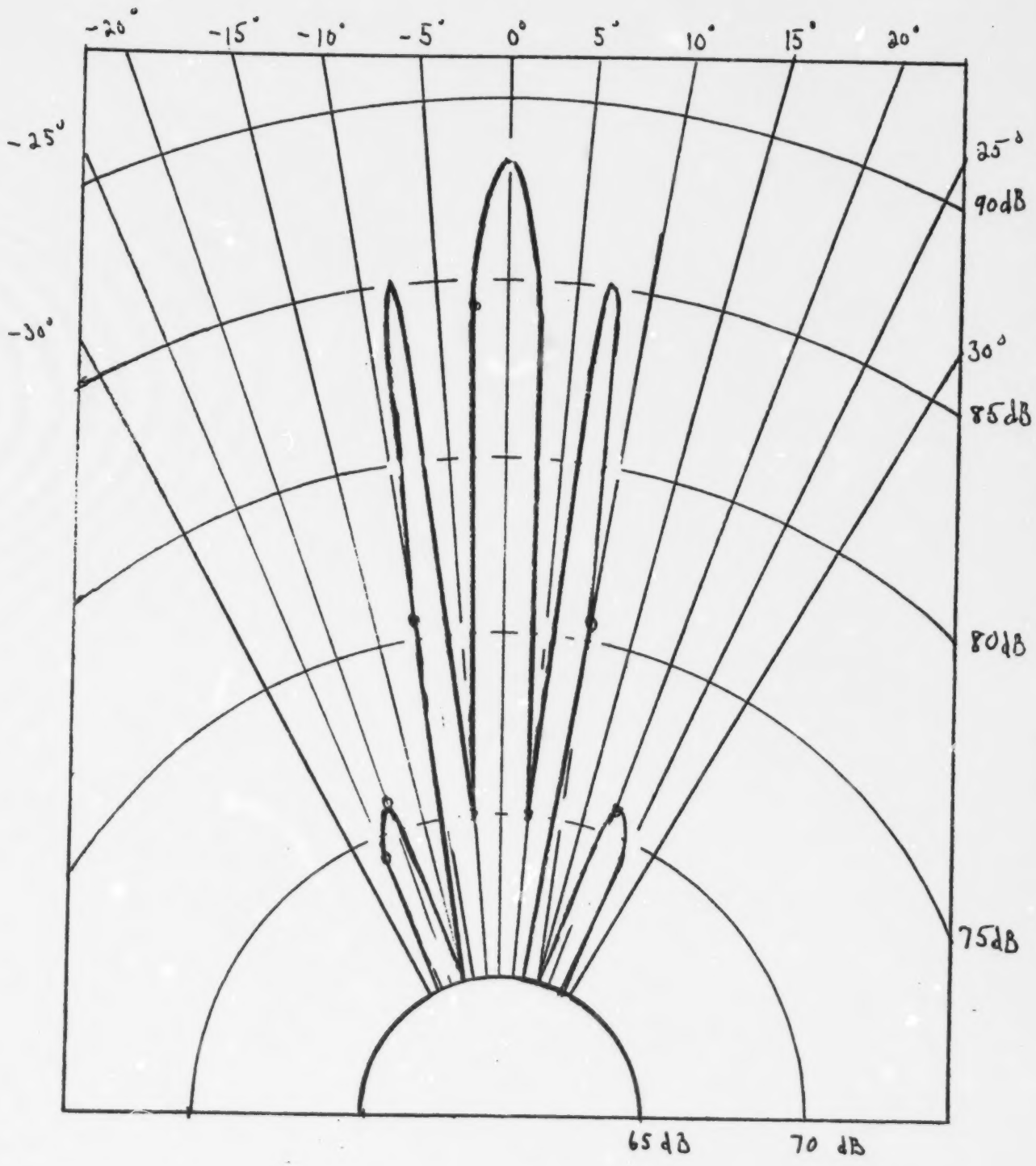


Figure 4 Diagramme de radiation

Transducteur avec disque d'aluminium collé sur la face avant.

Library and Information Centre
Transport Canada

TP 6786 F

INDICATEUR DE VITESSE DOPPLER À ULTRASONS POUR BRISE-GLACES

Préparé pour: Centre de développement des Transports.
Transports Canada

Juin 1985

Par: Raymond Roberge
Gentec Inc.,
Ste-Foy, Québec.

EQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche de Gentec Inc., se composait de:

M. C. Labbé, ing.
M. R. Roberge
Dr. M. Verreault
M. M. Drouin
et autres.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le personnel de la Garde Côtière du Canada, tout particulièrement les capitaines et les équipages du Des Groseillers, pour leur coopération lors des tests en condition de glace.

AVERTISSEMENT

Le contenu du présent rapport ne reflète que les opinions de l'auteur et ne saurait en aucun cas engager les politiques et positions officielles du Centre de Développement des Transports, Transports Canada.

Also available in English: "Ultrasonic Doppler Velocimeter for Icebreakers". TP 6786 E.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1	Nº du rapport Transports Canada	2.	Nº de l'étude — CDT	3.	Nº de catalogue du destinataire
	TP 6786 F		4774/4779		

4.	Titre et sous-titre	5.	Date du rapport
	Indicateur de vitesse Doppler à ultrasons pour brise-glaces		juin 1985
		6.	Nº du rapport de l'organisme exécutant

7.	Auteur(s)	8.	Nº de dossier Transports Canada
	Raymond Roberge		D1460-188

9.	Nom et adresse de l'organisme exécutant	10.	Nº de dossier — ASC
	Gentec Inc. 2625 rue Dalton Ste-Foy, Québec G1P 3S9		48SZ-T8200-2-2522
		11.	Nº de contrat — ASC ou Transports Canada
			1SZ82-00068

12.	Nom et adresse de l'organisme parrain	13.	Genre de rapport et période visée
	Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy Favreau 200 ouest, boul. Dorchester Suite 601, tour ouest, Montréal, Québec H2Z 1X4	14.	Code de l'organisme parrain

15.	Remarques additionnelles	16.	Agent de projet — CDT
			R.S. Nishizaki

17. Résumé

Ce rapport relate les travaux de développement, ainsi que les essais dans les champs de glace, d'un système ultrasonore devant mesurer précisément la vitesse d'un brise-glace en condition d'opération.

Dans la partie consacrée aux travaux de développement, le rapport décrit brièvement les principes de base des systèmes envisagés et les essais en laboratoire correspondant. Des difficultés d'application de la méthode interférométrique ont forcé le développement d'une deuxième approche fondée sur l'effet Doppler.

Les mesures et les essais en champs de glace furent effectués à bord du Des Groseillers. Les premières données portèrent principalement sur la mesure du bruit de fond. Suite à la production d'un prototype, des essais démontrent une faiblesse du côté de l'émission et de la détection du signal.

18	Mots-clés	19	Diffusion
	Mesure de la vitesse, effet Doppler, ultra-son, vélocimètre, brise-glace		Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20	Classification de sécurité (de ce rapport)	21	Classification de sécurité (de cette page)	22	Nombre de pages	23	Prix
	Non classifié		Non classifiée		19 + quatre appendices		aucun

CDT/TDC 79-005

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No	3. Recipient's Catalogue No
TP 6786 F	4774/4779	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Indicateur de vitesse Doppler à ultrasons pour brise-glaces	June 1985
	6. Performing Organization Report No
7. Author(s)	8. Transport Canada File No
Raymond Roberge	D1460-188
9. Performing Organization Name and Address Gentec Inc. 2625 Dalton St. Ste-Foy, Quebec G1P 3S9	10. DSS File No. 48SZ-T8200-2-2522
	11. DSS or Transport Canada Contract No 1SZ82-00068
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 200 Dorchester Blvd. West Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	13. Type of Report and Period Covered
	14. Sponsoring Agency Code
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer R.S. Nishizaki

17. Abstract

The report describes the development and subsequent testing in ice fields of an ultrasonic velocimeter intended to measure precisely the speed of an operating icebreaker.

In the development phase, two basic velocimeter design principles were considered and laboratory measurements and tests conducted. Difficulties with the application of the interferometric principle led to the use of the second approach based on the Doppler effect.

Tests and measurements obtained in the ice field were performed using the Des Groseillers icebreaker. Data was collected to measure the background noise in the ultrasonic region.

Tests of a prototype velocimeter showed a weakness in the transmitter. The signal generated was found to be weaker than the background noise.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Speed measurement, ultrasonic, Doppler, velocimeter, icebreaker	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	19 + four appendices	nil

TDC CDT 79-005

SOMMAIRE

Ce rapport présente le cheminement fait entre le 28 septembre 1982 et le 30 mai 1985 dans le but de mettre au point un appareil de mesure permettant l'obtention avec grande précision de la vitesse des brise-glaces lors d'opération. Une nouvelle méthode utilisant les ultrasons fut alors étudiée. Un prototype fut construit et testé en laboratoire. Les résultats obtenus furent probants. Une série de sorties sur le brise-glace, le Des Groseillers, nous permit de mettre le prototype à l'épreuve dans des conditions réelles. Après avoir résolu des problèmes mineurs associés au froid et à la vibration existant sur le bateau, il fut conclu que l'utilisation d'une source ultrasonore de plus grande puissance étant nécessaire.

TABLE DES MATIÈRES

		PAGE
1.	INTRODUCTION	1
2.	LES PRINCIPES DE BASE	2
	2.1 Le principe interférométrique	2
	2.2 L'effet Doppler	3
3.	MESURE DU BRUIT DE FOND ENVIRONNANT LE BRISE-GLACE	4
	3.1 Le montage de mesure	4
	3.2 Les conditions de tests	6
	3.3 Les résultats	6
4.	CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES MODÈLES	9
	4.1 Modèle utilisant le principe interférométrique	9
	4.2 Modèle utilisant le principe de l'effet Doppler	10
5.	RÉSULTATS DES TESTS FAITS EN LABORATOIRE	11
	5.1 Résultats des essais sur le modèle utilisant le principe interférométrique.	11
	5.2 Résultats des essais sur le modèle utilisant l'effet Doppler	11
6.	CONSTRUCTION DU PROTOTYPE	14
	6.1 Description du système	14
7.	RÉSULTATS ET ANALYSES DES TESTS FAITS SUR UN BRISE-GLACE	17
	7.1 Essai du prototype sur le Des Groseillers	17
	7.2 Analyse des résultats	17
8.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	19
	8.1 Conclusions	19
	8.2 Recommandations	19

Appendice A: Analyse acoustique (Vélocimètre ultrason)
Appendice B: Théorie de la détection hétérodyne
Appendice C: Les détecteurs-émetteurs CP Channel
Appendice D: Les détecteurs ultrasonores de Supratec.

LISTE DES FIGURES

		PAGE
Figure 1	Méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène d'interférence	2
Figure 2	Méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène Doppler	3
Figure 3	Lieu de la mesure du bruit de fond	4
Figure 4	Mesure à l'avant de navire, position 1	5
Figure 5	Mesure sur le coté du navire, position 2	5
Figure 6	Photographie de montage utilisé lors des essais sur le bateau	7
Figure 7	Bruit de fond lorsque le navire est mobile	7
Figure 8	Bruit de fond lorsque le navire est en mouvement, en eau libre	8
Figure 9	Bruit de fond lorsque le navire est en mouvement, dans un champ de glace	8
Figure 10	Montage servant à expérimenter la méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène d'interférence	9
Figure 11	Montage servant à expérimenter la méthode des vitesses utilisant le phénomène Doppler	10
Figure 12a)	Mise en graphique des résultats du tableau 1	13
Figure 12b)	Mise en graphique des résultats du tableau 2	13
Figure 13	Schéma plan d'ensemble du prototype utilisé	14
Figure 14	Schéma plan de la partie détecteur-émission	15
Figure 15	Illustration du système utilisé	16
Figure 16	Site, sur le bateau, où le prototype a été essayé	18

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1	Test comparatif entre la vitesse affichée (vitesse évaluée) et la vitesse mesurée (vitesse réelle) (14 novembre 1983).	12
Tableau 2	Test comparatif entre la vitesse affichée (vitesse évaluée) et la vitesse mesurée (vitesse réelle) (15 novembre 1983).	12

1. INTRODUCTION

Ce rapport relate les travaux de recherche et de développement effectués dans le cadre d'un projet supporté par Transports Canada. L'objet du travail portait essentiellement sur le développement d'un indicateur de vitesse basé sur l'effet Doppler appliqué aux ultrasons et visait le domaine des brise-glaces.

Antérieurement à la présentation de la proposition technique ayant conduit au contrat, Gentec Inc., avait travaillé sur un système semblable utilisant un laser HeNe. Cette approche fût abandonnée étant donné les problèmes de sécurité découlant de la source haute énergie. Une enquête ayant démontré l'intérêt d'un système de mesure haute précision pour les brise-glaces, nous présentions l'idée du développement d'un système semblable basé sur les ultrasons.

Les difficultés techniques rencontrées au cours du projet furent l'intensité du bruit de fond et les conditions de vibrations intenses et de forte humidité rencontrés sur les brise-glaces. Aucune source suffisamment intense et efficace ne peut être identifiée au cours du projet. Le recours à un spécialiste d'une firme spécialisée en ultrason, Supratec, ne donna aucun résultat valable.

2. LES PRINCIPES DE BASE

2.1 Le principe interférométrique

Lorsque deux sources générant une perturbation ondulatoire (son, lumière, etc.,) oscillant à la même fréquence sont dirigées vers une surface d'observation commune, un phénomène interférométrique appelé les franges de Young prend naissance; voir la figure 1. Si la surface d'observation comprend des défauts ou des imperfections dont les dimensions sont plus petites ou de l'ordre des franges d'interférence alors un signal proportionnel au nombre moyen de frange parcourue par unité de temps, la vitesse, peut être détecté.

Les conditions pour une mesure précise sont alors; a) la génération de fronts d'ondes plans et b) la disponibilité de défauts de surface dont les dimensions sont compatibles avec la distance interfrange (voir l'analyse théorique de l'annexe A). Dans le cas d'un navire opérant dans un champ de glace, les conditions de rugosité relative de la surface glacée et le vaste échantillonnage des dimensions des débris de glace assurent la deuxième condition. Pour la première il faut simplement choisir des sources à grande surface et à les localiser aussi loin que possible de la surface d'observation.

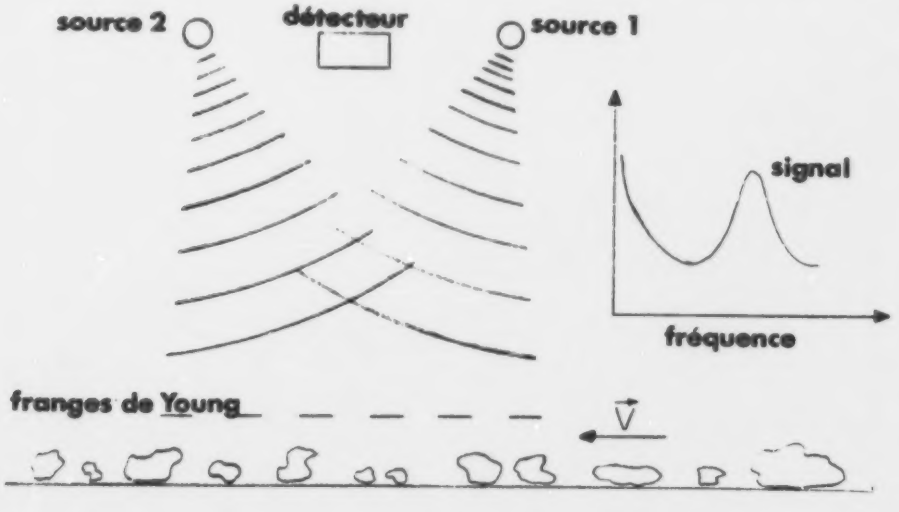


Figure 1: Méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène d'interférence

2.2 L'effet Doppler

Lorsqu'une onde sonore est réfléchie par une surface en mouvement sa fréquence augmente si l'obstacle se dirige vers la source et diminue lorsque l'obstacle s'éloigne de la source. La variation de fréquence ainsi obtenue est proportionnelle à la vitesse relative de l'obstacle et de la source.

Comparativement à la méthode précendente, ce principe nécessite qu'une source à ultrason et qu'un détecteur, limitant ainsi l'erreur sur la mesure et la détection des signaux (voir la figure 2).

La vitesse relative, Δv, entre le navire et le champ de glace se calcule alors grâce à l'équation suivante:

$$\Delta v = \frac{\lambda \Delta f}{2 \cos(\alpha)}$$

λ : longueur d'onde de l'émetteur

Δf: variation de la fréquence entre la source et le détecteur

α: angle entre la normale au front d'onde et la tangente à la surface d'observation.

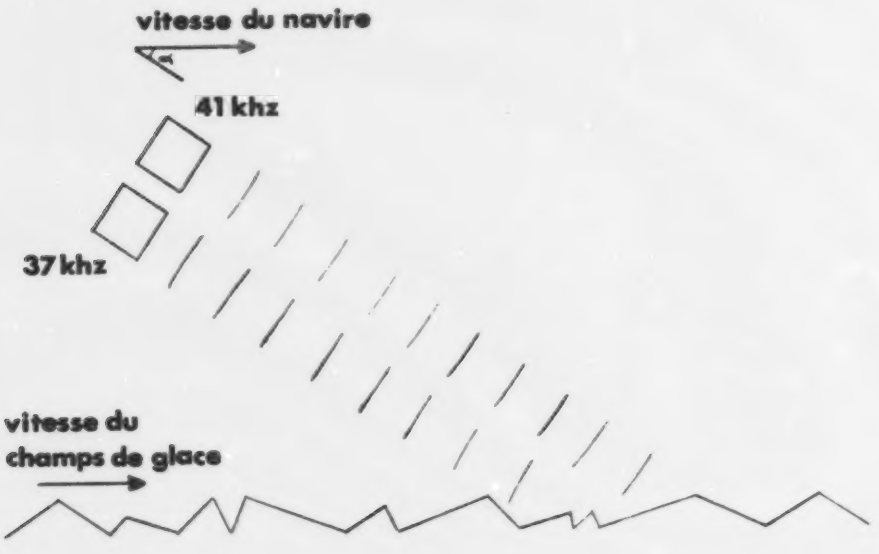


Figure: 2 Méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène Doppler

3. MESURE DU BRUIT DE FOND ENVIRONNANT LE BRISE-GLACE

3.1 Le montage de mesure

Le rapport signal-bruit représente le principal défi dans l'utilisation d'un système de mesure à haute précision. Un ensemble composé de 2 microphones hautes sensibilités et présentant une large bande spectrale jusqu'à 50 K Hz,d'un analyseur spectral, d'un oscilloscope et d'une caméra fut monté sur le Des Groseillers pour analyser le bruit de fond généré par le navire en conditions d'opération. La figure 3 montre les points de mesure; la position no 1 correspond à l'avant du navire et la position no 2 correspond à tribord avant, au niveau indiqué sur la figure.

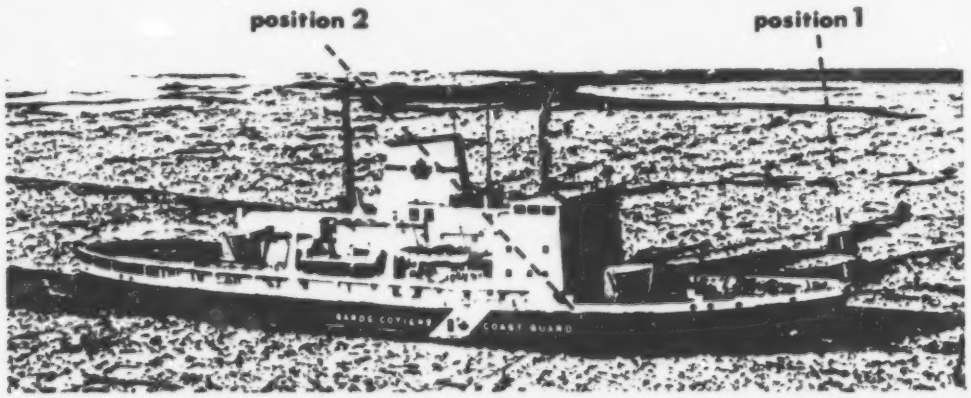


Figure 3: Lieu de la mesure du bruit de fond

Dans un premier temps le microphone fut simplement fixé au navire et dirigé vers l'avant, figure 4 puis vers le côté au niveau de la position no. 2, figure 5 Par la suite le miroir parabolique fut ajouté au microphone pour assurer que le bruit mesuré provenait bien de la région où les mesures de vitesse doivent être prises.

Un cable coaxial spécial reliait le microphone à l'analyseur spectral situé dans un local spécialement aménagé à l'intérieur du navire.

Figure 4 : Mesure à l'avant du navire, position 1

Figure 5: Mesure sur le coté du navire, position 2

3.2 Les conditions des tests

Les mesures du bruit de fond correspondant à la position no 1 furent effectuées lors des sorties régulières du Des Groseillers sur le fleuve St-Laurent, au niveau de Québec, au cours de l'hiver 1982-1983. Les tests correspondant à la position no 2 furent effectués sur le Saguenay à la fin de l'hiver 1983. Dans le cas des essais sur le Saguenay, un bris dans le cable coaxial nous força à éliminer la première partie des mesures. Seules les données correspondant au retour du navire furent conservées. Heureusement le capitaine accepta de faire dévier le navire de sa trajectoire prévue pour nous permettre l'acquisition de données dans un champ de glace solide.

3.3 Les résultats

Les tracés des figures 7 à 9 correspondent à une résolution de 1 kHz avec 5 kHz par centimètre sur l'échelle horizontale et 10 db/cm sur l'échelle verticale. Sur chacune des figures le tracé inférieur indique le niveau de bruit électronique intrinsèque au système de détection.

Le tracé supérieur de la figure 7 indique le bruit de fond lorsque le navire demeure immobile par rapport à l'eau et à la glace. Dans ce premier cas, le bruit de fond ne couvre que les premiers vingt kHz du spectre avec un maximum de 30 db à environ 5 kHz.

Le tracé supérieur de la figure 8 montre un accroissement général du bruit et un déplacement de la fréquence maximale à environ 30 kHz. L'enrégistrement du bruit ambiant correspond à une opération en eau libre et inclut le bruit du navire et de l'eau déplacée par ce dernier.

Finalement le tracé supérieur de la figure 9 correspond à l'opération du navire dans un champ de glace. La baisse du signal à 50 kHz inclut l'effet combiné de la diminution du bruit de fond et de l'abaissement de la sensibilité du microphone utilisé. (4149 avec ogive, Bruel et Kjaer). Dans ce cas nous observons un bruit de l'ordre de 25 db à 25 kHz et 12 db à 40 kHz. Ces mesures indiquent le seuil à partir duquel il sera possible de détecter un signal.

Figure 6: Photographie de montage utilisé lors des essais sur le bateau.

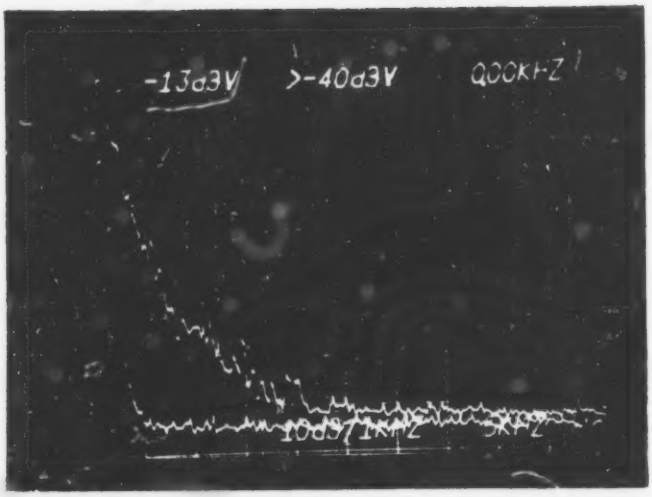


Figure 7 : Bruit de fond lorsque le navire est immobile.

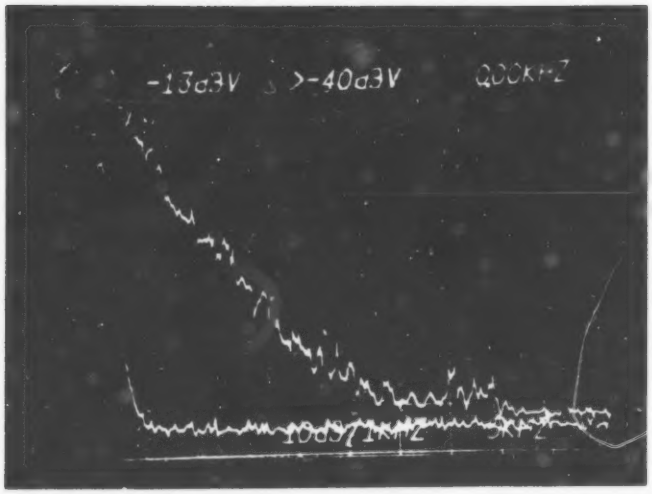


Figure 8: Bruit de fond lorsque le navire est en mouvement, en eau libre.

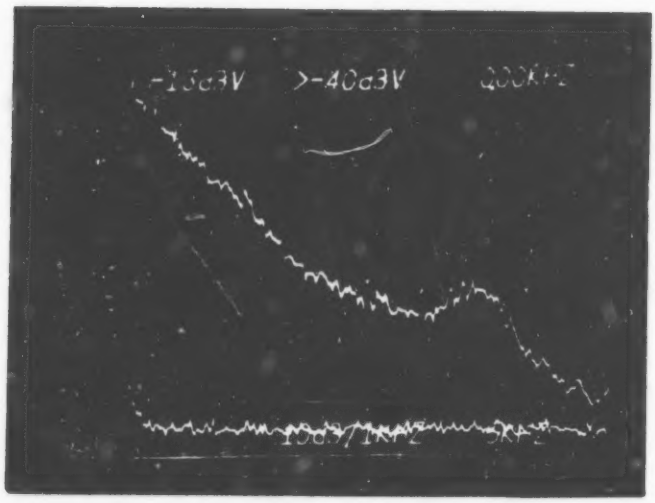


Figure 9: Bruit de fond lorsque le navire est en mouvement, dans un champ de glace.

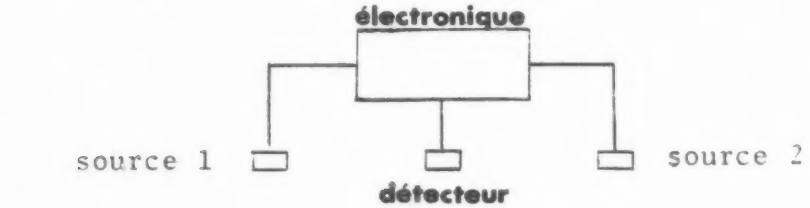
4. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES MODELES

4.1 Modèle utilisant le principe interférométrique

Les essais en laboratoire furent effectués grâce à un simulateur composé d'une courroie flexible entrainée par un moteur à vitesse variable. La surface en mouvement supportant des obstacles composés de plastique poreux recouverts de papier d'aluminium. La dimension de ces obstacles reproduisait les défauts de la surface glacée et retournait la signal recherché. Le mécanisme d'entrainement pouvant inverser le mouvement, ce montage nous permet de simuler la marche avant et le recul du navire.

Les principaux problèmes liés au simulateur s'observent au niveau du bruit de fond généré par le moteur d'entrainement et les échos parasites dus aux divers objets matériels entourant le montage et aux murs du laboratoire.

Les sources et les détecteurs à ultrason prenaient place sur un support vertical monté en face du simulateur. Tout au long des tests, la distance entre le support des sources et la courroie varia de quelques 30 centimètres à plus de 4 mètres.



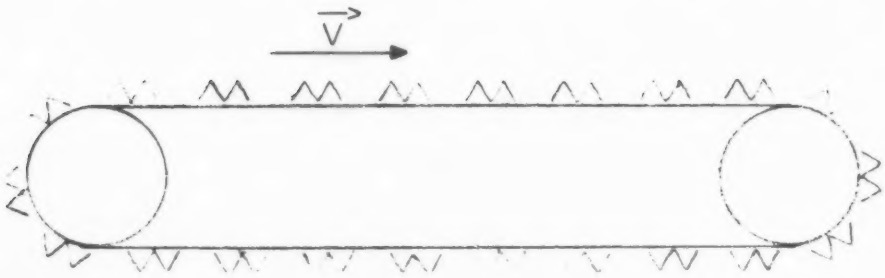


Figure 10: Montage servant à expérimenter la méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène interférence.

4.2 Modèle utilisant le principe de l'effet Doppler

Le simulateur monté pour le système Doppler utilisait la même surface que pour le montage prédédent. La principale différence se retrouvait dans le positionnement de l'ensemble source-détecteur. Dans ce cas il fallait s'approcher d'une direction parallèle au mouvement du navire. Une comparaison des figures 2 et 11 montre le réalisme de la simulation. Dans le cas du montage utilisant l'effet Doppler le principe de la détection hétérodyne fut utilisé. (Voir l'appendice B pour le développement de la théorie).

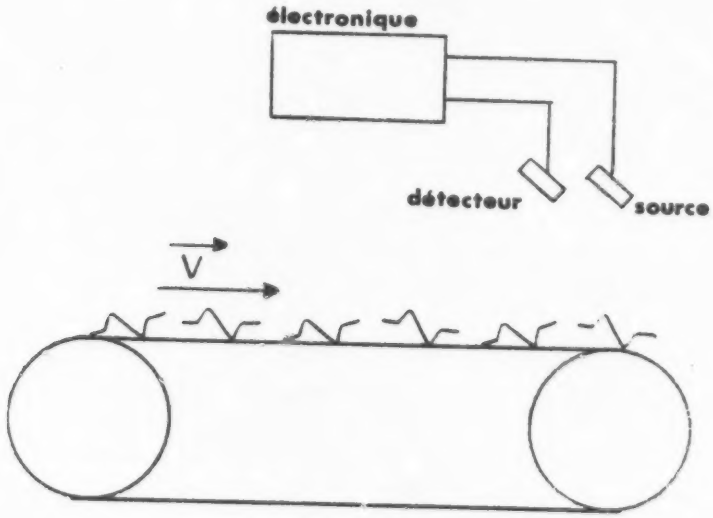


Figure 11: Montage servant à expérimenter la méthode d'évaluation des vitesses utilisant le phénomène Doppler.

5. RÉSULTATS DES TESTS FAITS EN LABORATOIRE

5.1 Résultats des essais sur le modèle utilisant le principe interférométrique.

La configuration décrite en 4.1 correspond à une réplique exacte du vélocimètre optique à la base de notre proposition initiale. Malheureusement, et ce malgré l'essai de toutes les configurations possibles aucun phénomène stable et suffisamment intense ne pu être observé. Il est probable que la cohérence spatiale et temporelle des ondes utilisées dépassait largement les dimensions totales du laboratoire ce qui entraînait la génération d'une multitude de phénomènes interférométriques parasites. (Dans le cas du système optique la cohérence temporelle ne dépassait guère 30 centimètres).

5.2 Résultats des essais sur le modèle utilisant l'effet Doppler.

Les tableaux 1 et 2 ainsi que leurs représentations graphiques (figure 12a-12b) nous permettent d'évaluer l'erreur absolue et la corrélation existante entre les vitesses réelles (vitesse mésurée) et les vitesses évaluées (vitesse affichée).

On peut vérifier qu'il existe une très bonne corrélation entre ces deux valeurs, au dessus de .999 pour les deux séries de résultats. Les erreurs absolues, si l'on retire les extremums, restent dans la limite du décimètre par seconde pour les tests qui ont été fait le 15 novembre. Pour ceux fait le 14 novembre, cette erreur absolue se situé entre 10 et 20 cm/sec. On remarquera que cette erreur semble indépendante de la grandeur des vitesses évaluées, ceci nous permettrait d'utiliser cette méthode pour des vitesses de l'ordre d'un mètre par seconde et moins.

Affichée	Mesurée	Ecart
+ 3.50 m/sec	10.89 sec/10 tours = 3.32 m/s	- 0.18 m/s
+ 3.00 m/sec	12.40 sec/10 tours = 2.92 m/s	- 0.08 m/s
+ 2.40 m/sec	15.24 sec/10 tours = 2.38 m/s	- 0.02 m/s
+ 2.10 m/sec	18.06 sec/10 tours = 2.00 m/s	- 0.10 m/s
+ 1.50 m/sec	24.95 sec/10 tours = 1.45 m/s	- 0.05 m/s
+ 1.00 m/sec	37.21 sec/10 tours = 0.97 m/s	- 0.03 m/s
+ 0.60 m/sec	67.5 sec/10 tours = 0.54 m/s	- 0.06 m/s
0.0 m/sec		
- 0.50 m/sec	61.09 sec/10 tours = 0.59 m/s	+ 0.03 m/s
- 1.00 m/sec	32.93 sec/10 tours = 1.10 m/s	+ 0.10 m/s
- 1.50 m/sec	23.60 sec/10 tours = 1.53 m/s	+ 0.03 m/s
- 2.00 m/sec	17.17 sec/10 tours = 2.11 m/s	+ 0.11 m/s
- 2.50 m/sec	13.54 sec/10 tours = 2.67 m/s	+ 0.17 m/s
- 3.30 m/sec	11.10 sec/10 tours = 3.26 m/s	- 0.04 m/s
- 3.60 m/sec	10.22 sec/10 tours = 3.54 m/s	- 0.06 m/s

Longueur du tapis: 3.62 mètres/tour

Tableau 1: test comparatif entre la vitesse affichée (vitesse évaluée) et la vitesse mesurée (vitesse réelle) (14 novembre 1983).

Affichée	Mesurée	Ecart
- 4 m/sec	6.34 sec/10 tours = 5.71 m/sec	
- 3.5 m/sec	10.41 sec/10 tours = 3.50 m/sec	0.00 m/sec
- 3.0 m/sec	11.49 sec/10 tours = 3.15 m/sec	+ 0.15 m/sec
- 2.5 m/sec	13.90 sec/10 tours = 2.60 m/sec	+ 0.10 m/sec
- 2.0 m/sec	16.52 sec/10 tours = 2.19 m/sec	+ 0.19 m/sec
- 1.5 m/sec	21.63 sec/10 tours = 1.67 m/sec	+ 0.17 m/sec
- 1.0 m/sec	35.36 sec/10 tours = 1.14 m/sec	+ 0.14 m/sec
- 0.5 m/sec	58.68 sec/10 tours = 0.62 m/sec	+ 0.12 m/sec
- 0.0 m/sec		
+ 0.5 m/sec	63.49 sec/10 tours = 0.57 m/sec	+ 0.07 m/sec
+ 1.0 m/sec	35.31 sec/10 tours = 1.01 m/sec	+ 0.01 m/sec
+ 1.5 m/sec	25.41 sec/10 tours = 1.42 m/sec	- 0.08 m/sec
+ 2.0 m/sec	17.55 sec/10 tours = 2.06 m/sec	+ 0.06 m/sec
+ 2.5 m/sec	14.53 sec/10 tours = 2.49 m/sec	- 0.01 m/sec
+ 3.0 m/sec	11.81 sec/10 tours = 3.07 m/sec	+ 0.01 m/sec
+ 3.5 m/sec	9.74 sec/10 tours = 3.72 m/sec	+ 0.22 m/sec
+ 4.0 m/sec	8.61 sec/10 tours = 4.20 m/sec	+ 0.2 m/sec

Longueur du tapis: 3.62 mètres/tour

Tableau 2: test comparatif entre la vitesse affichée (vitesse évaluée) et la vitesse mesurée (vitesse réelle) (15 novembre 1983)

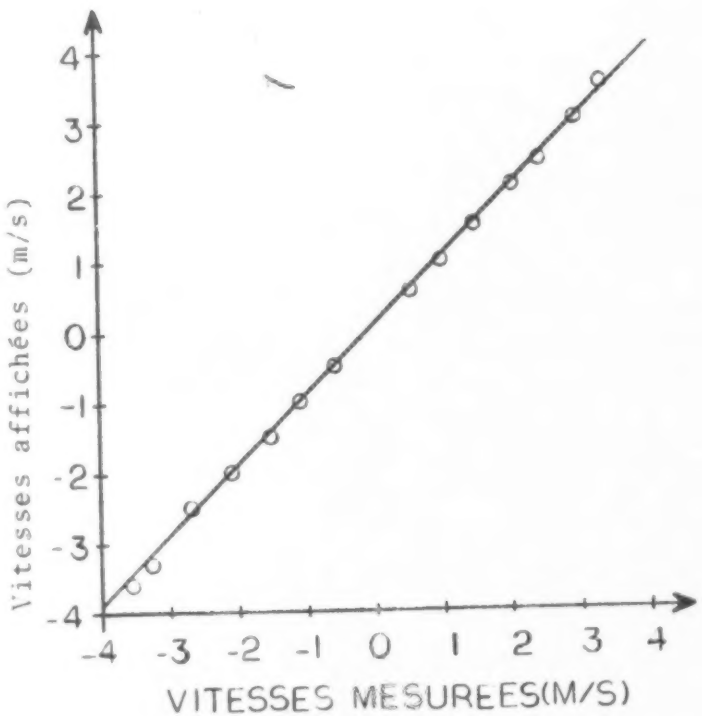


Figure 12a) Mise en graphique des résultats du tableau 1.

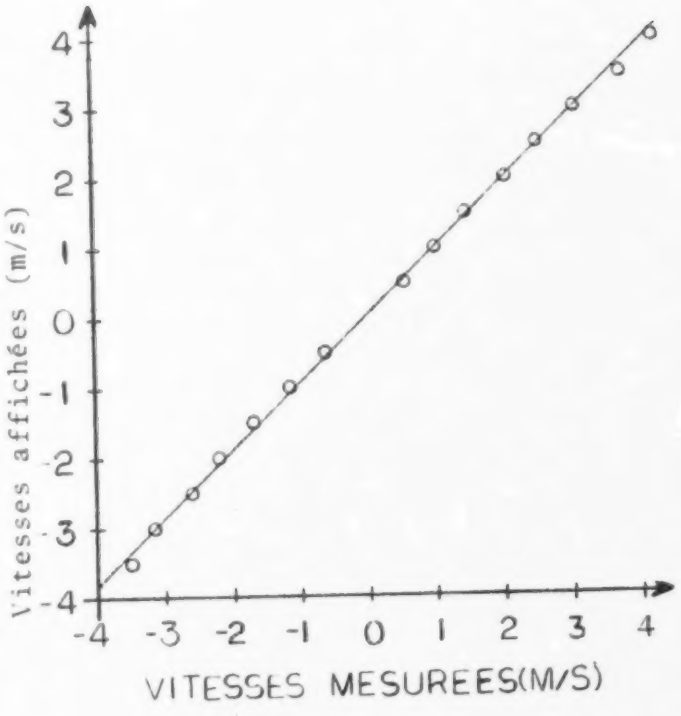


Figure 12b) Mise en graphique des résultats du tableau 2.

6. CONSTRUCTION DU PROTOTYPE

6.1 Description du système

La version finale le système de mesure de vitesse comprend: un générateur de fréquence de précision, un amplificateur Bruel et Kjaer, un émetteur et un récepteur piézoélectrique fabriqué par CP Channel et l'unité d'acquisition de données (voir fig. 13).

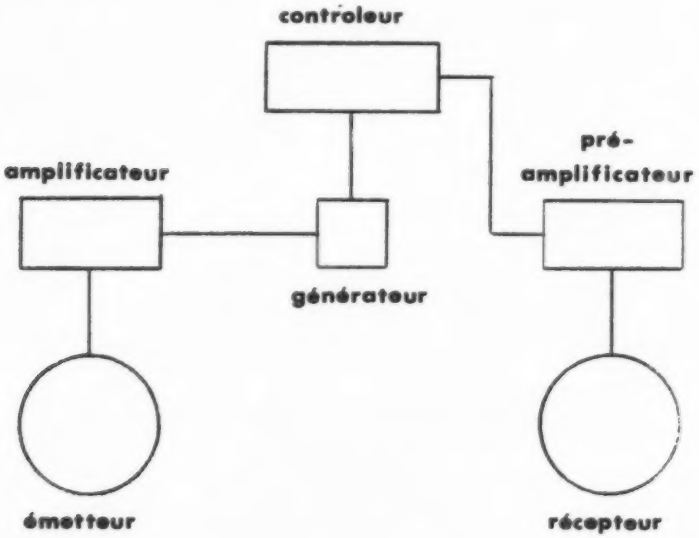


Figure 13: Schéma d'ensemble du prototype utilisé.

Le générateur de fréquence est basé sur un oscillateur à crystal de 3 MHz. Deux fréquences différentes (37 KHz et 41 KHz) sont obtenues par divisions électroniques de l'oscillation principal. Deux trains d'ondes de durée et de période programmable sont générés.

Le train d'onde à 41 KHz est amplifié et appliqué à l'émetteur ultrasonore. Le signal réfléchi par la surface est perçu par le détecteur et amené après préamplification à l'unité de traitement.

L'unité d'acquisition, par une détection hétérodyne avec le train d'onde, extrait l'information du signal perçu. Cette information est ensuite analysée par un circuit à microprocesseur qui affiche la vitesse correspondant au signal mesuré.

Le système de détection-émission utilisait deux convertisseurs ultrasonores de type; CP Channel modèle CPAX 40-HE, dont leur fréquence de résonance était centrée sur 41 KHz (voir annexe C). Ils étaient placés au foyer d'un miroir parabolique fait en aluminium (distance focale: 32.5 cm). Le tout était placé dans un cylindre à lequel il était relié par 3 points d'attache (voir figure 14). Cette structure permettait une bonne protection contre le vent (source de bruit de basse fréquence) et contre les vibrations venant du bateau lui même.

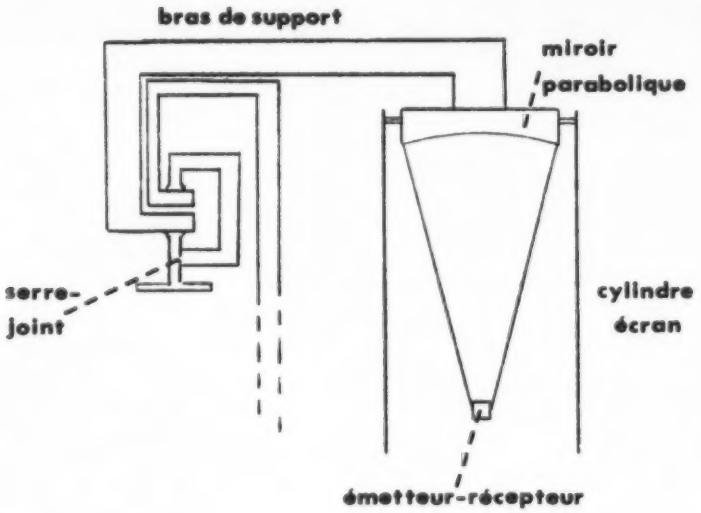


Figure 14: Schéma de la partie détecteur-émission

La figure 15 illustre l'aspect physique du système utilisé. On y voit, à chaque extrémité, les miroirs paraboliques et leurs détecteurs, immédiatement à côté les amplificateurs de puissance et finalement, au centre, l'unité de contrôle et de mesure.

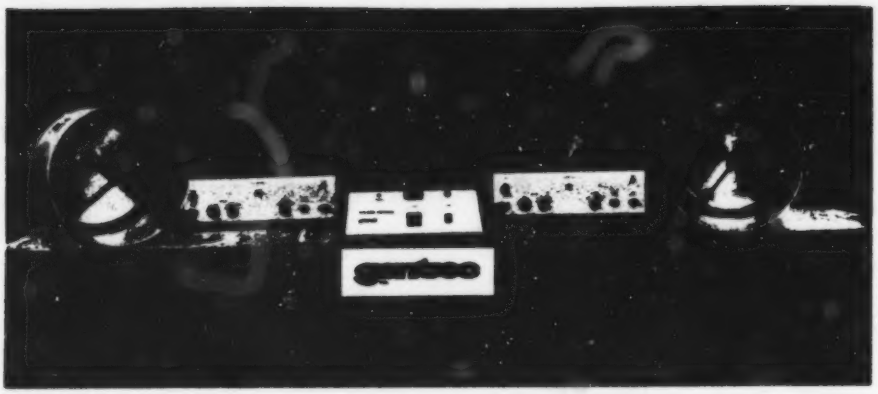


Figure 15: Illustration du système utilisé.

7. RÉSULTATS ET ANALYSES DES TESTS FAITS SUR UN BRISE-GLACE

7.1 Essai du prototype sur le Des Groseillers

L'essai du prototype décrit plus haut fut fait sur le Des Groseillers lors d'un voyage fait le 8 février 1984 entre Québec et Trois-Rivières. Après de multiples essais, il fut conclu que la meilleure réception était obtenue lorsque l'émetteur était placé à 45° par rapport à la glace et que le récepteur était à la verticale du point visé sur la glace par l'émetteur.

De plus, deux positions par rapport au navire furent expérimentées (voir figure 16). Les meilleurs résultats furent obtenues à la position arrière du bateau. Ce dernier résultat est propablement relié au fait qu'à cette hauteur, la vague d'étrave est de beaucoup diminuée,ce qui permet une bonne réflection du signal émit.

Certains problèmes secondaires furent rencontrés lors de cette sortie. Tout d'abord, il sera important de contrôler la température de fonctionnement de l'instrumentation électronique. Un froid trop grand peut stopper (geler) différents étages du système d'amplification. Les vibrations du bateau peuvent être très intenses. Les filets du système de fixation des émetteurs ont été arrachés lors de ces essais. Il sera donc nécessaire d'augmenter la solidité de cette fixation.

Il a été expérimenté, lors de cette sortie un nouveau modèle de convertisseur ultrasonore. Il s'agissait d'un prototype proposé par Supratec Inc., (voir annexe D). Or après essai et comparaison, il s'est avéré que ce prototype était moins performant que le modèle fait par CP Channel.

7.2 Analyse des résultats

Lors de la sortie fait le 8 février 1984 sur le Des Groseillers, il a été possible de démontrer que le prototype ultrasonore à effet Doppler permettait d'obtenir un signal sensible à la vitesse des glaces passant près du navire. Cependant, la force du signal dépendait beaucoup de la nature de la glace. Ce qui nous incite à croire que l'utilisation d'une source ultrasonore de plus grande puissance serait plus appropriée et éliminerait les disparitions momentanées de signal.

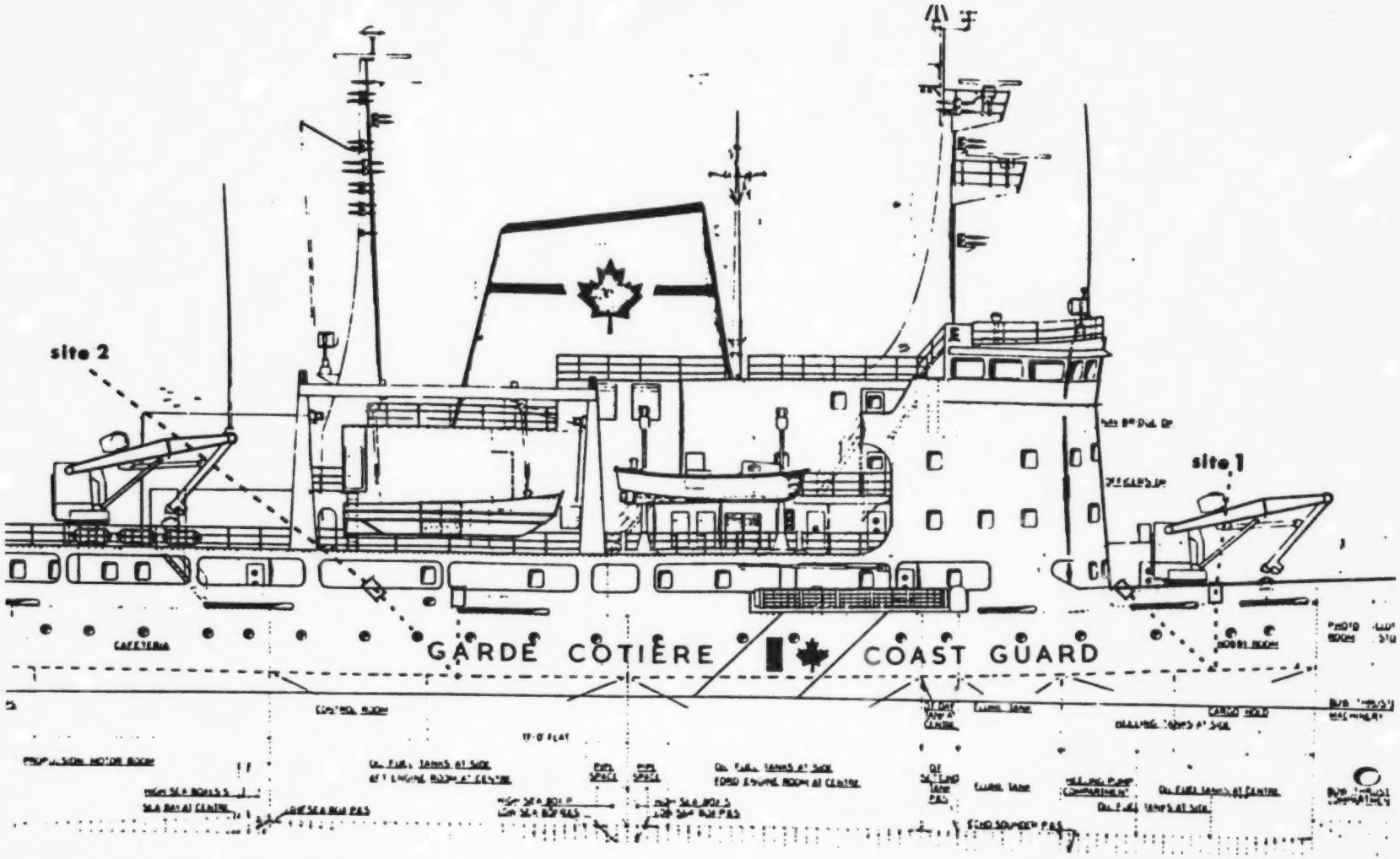


Figure 16. Site, sur le bateau, où le prototype a été essayé.

8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.1 Conclusions

Le système conçu au cours de ce projet fonctionne bien en conditions de laboratoire. Le niveau de corrélation entre la vitesse mesurée par une méthode mécanique et celle obtenue par le système à ultrason assure une confiance adéquate pour les vitesses de moins de 1 mètre par seconde.

L'utilisation sur un brise-glace en conditions d'opération révèle cependant d'importantes faiblesses au niveau opérationnel. Premièrement, le signal utile se perd rapidement dans le bruit environnant et ce aussitôt que le navire entre dans le champ de glace. Deuxièmement, la source et le détecteur utilisés réagissent mal aux conditions de température rencontrées. Troisièmement les ajustements mécaniques sont modifiés par l'opération à long terme.

8.2 Recommandations

Suite aux conclusions précédentes nous recommandons qu'un deuxième effort de développement soit entrepris au cours de l'hiver 1985-86. Le travail devrait alors comprendre les étapes suivantes:

1- Achat et adaptation d'une source plus puissante et d'un détecteur adapté.

2- Modification et adaptation du tandem émetteur récepteur (mécanique et électronique).

3- Etude de comportement en condition de froid.

4- Installation et essai sur un brise-glace.

Appendice A

Analyse acoustique
(vélocimètre à ultrasons)

P R O J E T

VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE

Une analyse acoustique

faite pour GENTEC inc.

PAR

SUPRATEC

RÉALISATIONS TECHNOLOGIQUES

Jean-Luc Dion, ing.-Dr

Mesures et contrôles
Électronique
Micro-ordinateurs
Optique
Ultrasonique

3760, rue Montpellier, Trois-Rivières Ouest, Quebec G8Y 3P2 Tél.: (819) 378-[illegible]

MARS 1983

TABLE DES MATIÈRES

1-	Description générale du problème	1
2-	Sources d'ultrasons et profil d'émission	2
3-	Champ acoustique devant deux sources	3
4-	Calcul de l'interfrange	6
5-	Vitesse relative navire-glace	8
6-	Exemple de calculs	9
7-	Excitation des sources	9
8-	Correction pour les variations de température	9
9-	Géométrie du système de mesure	10
10-	Effet du vent sur la mesure	11
11-	Orientation des sources	11

* * * * * * *

Projet "VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE"

Une analyse acoustique

Par Jean-Luc Dion, ing.-Dr
Supratec inc.
Mars 1983

1- DESCRIPTION GÉNÉRALE DU PROBLÈME

Sur un navire N (fig. 1) est fixé un dispositif H comportant deux sources d'ultrasons S_1, S_2 émettant des ondes de fréquences f_1, f_2 vers l'eau où flottent des glaces G. Le champ acoustique se déplaçant relativement à la glace, la fraction de l'énergie diffusée par la surface qui est captée en H a une intensité qui est modulée à une fréquence (fréquence de battement) qui est fonction de la vitesse relative glace-navire $v_{gn} = - v_{ng}$.

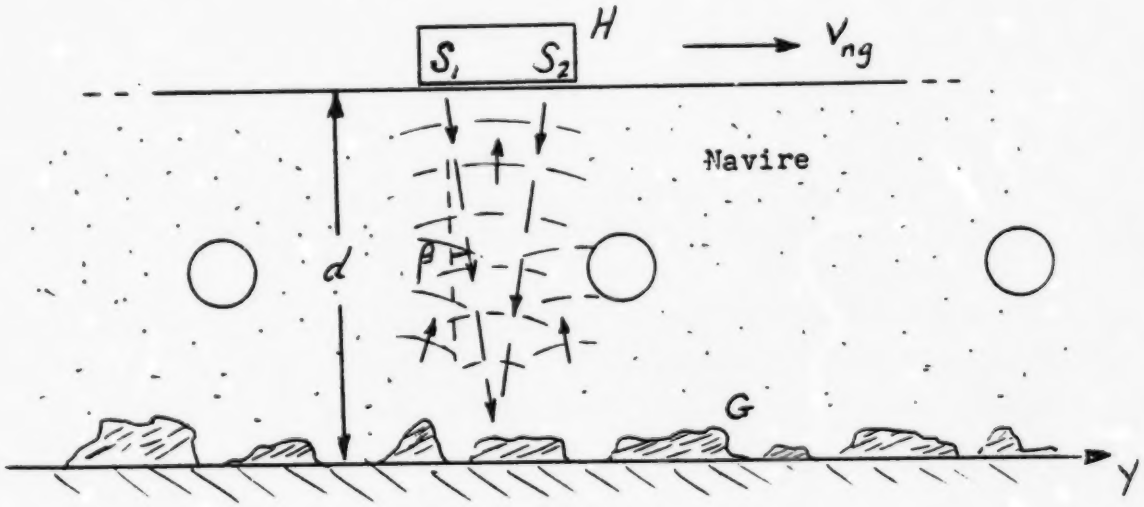


Figure 1

Nous allons déterminer la relation entre cette fréquence f_b et v_{gn} et analyser quelques conditions de fonctionnement.

2- SOURCES D'ULTRASONS ET PROFIL D'ÉMISSION

La fréquence ultrasonore qui semble appropriée à ce système est d'environ 30 kHz. La longueur d'onde correspondante est de 11 mm. Parmi les avantages de ce choix, il y a la faible atténuation et la simplicité de l'équipement: par exemple, des haut-parleurs pour les aigus suffiront probablement comme sources, et on pourra utiliser des amplificateurs pour système de son.

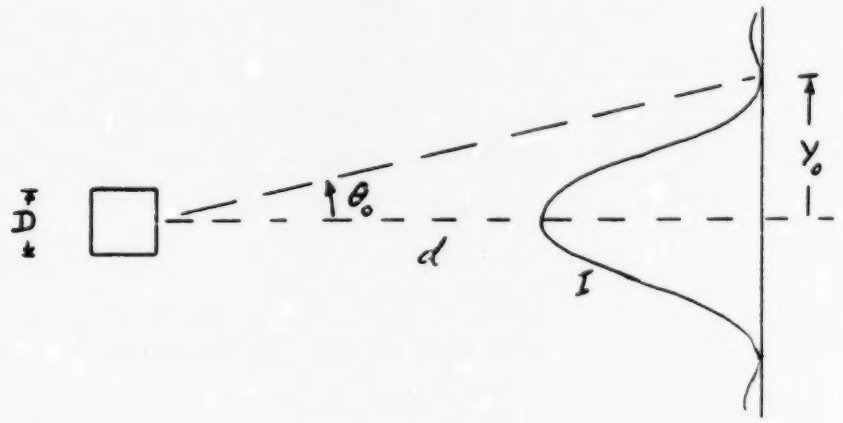


Figure 2 Profil d'émission d'une source ultrasonore considérée comme un piston oscillant, à grande distance.

Le profil d'émission à grande distance d'un piston oscillant de diamètre D est représenté à la fig. 2. La plus grande partie de l'énergie est concentrée dans un cercle de rayon y_o sous-tendant θ_o à la source. On a:

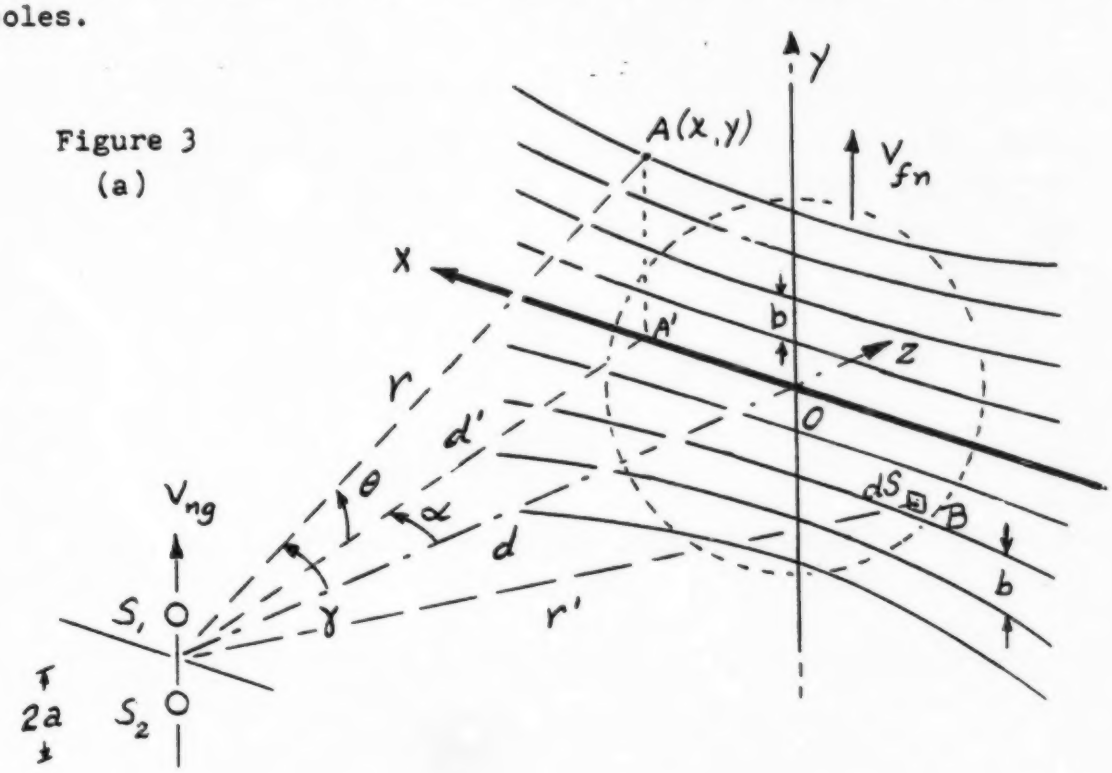
$$\sin \theta_o = \frac{1{,}22\,\lambda}{D} \qquad (1)$$

où λ est la longueur d'onde. Par exemple, à 30 kHz, avec D = 10 cm, on calcule $\theta_o = 7{,}7^\circ$. L'intensité I tombe à la moitié de sa valeur au centre I_m pour $\theta = 3^\circ$ approximativement.

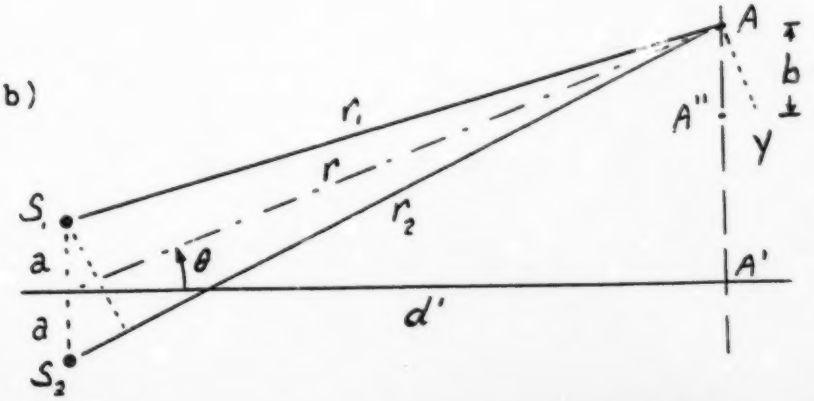
3- CHAMP ACOUSTIQUE DEVANT DEUX SOURCES

Il s'agit ici de trouver une expression du champ acoustique à la surface de l'eau, particulièrement le long de l'axe y parallèle à celui du navire. La fig. 3 définit diverses grandeurs qui interviennent et montre particulièrement l'aspect des franges d'interférence dans le plan x-O-y de la surface perpendiculaire à la direction d'émission et qui coincide pratiquement avec la surface de l'eau. Ces franges sont décrites par des arcs d'hyperboles.

Figure 3
(a)



(b)



Les ondes émises par S_1 et S_2 sont décrites par l'expression de la vitesse acoustique:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_1(r_1)\cos(\omega_1 t - k_1 r_1) \\ u_2(r_2,t) &= u_2(r_2)\cos(\omega_2 t - k_2 r_2) \end{aligned} \qquad (2)$$

où,

$$\begin{aligned} u_1(r_1) &= u_{1o}\, e^{-\alpha r_1} \\ u_2(r_2) &= u_{2o}\, e^{-\alpha r_2} \end{aligned} \qquad (3)$$

où α est le coefficient d'atténuation dans l'air à cette fréquence. La pulsation $\omega = 2\pi f$, f étant la fréquence. Au voisinage de l'origine O dans le plan x-O-y, les distances aux sources varient peu, de sorte qu'on peut considérer les amplitudes comme pratiquement constantes:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_{1o}\cos(\omega_1 t - k_1 r_1) \\ u_2(r_2,t) &= u_{2o}\cos(\omega_2 t - k_2 r_2) \end{aligned} \qquad (4)$$

La constante de propagation (vecteur d'onde) $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, c étant la vitesse du son dans l'air.

Sous forme complexe, on a:

$$\begin{aligned} u_1(r_1,t) &= u_{1o}\, e^{-jk_1 r_1}\, e^{j\omega_1 t} \\ u_2(r_2,t) &= u_{2o}\, e^{-jk_2 r_2}\, e^{j\omega_2 t} \end{aligned} \qquad (5)$$

Si $d \gg a$, on a

$$\begin{aligned} r_1 &\simeq r - a\sin\theta \\ r_2 &\simeq r + a\sin\theta \end{aligned} \qquad (6)$$

Avec $r = d/\sin\gamma$

Si les fréquences f_1 et f_2 des sources sont égales, la figure d'interférence est stationnaire. Mais, si les fréquences diffèrent, elle se déplace. En particulier, au voisinage de O le long de O-y (Fig. 3-a), les franges se déplacent à la vitesse v_{fn} par rapport au navire.

Le déphasage des vibrations produites par les sources en A est:

$$\varphi = (\omega_1 t - k_1 r_1) - (\omega_2 t - k_2 r_2)$$

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 r_1 - k_2 r_2)$$

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)r + (k_1 + k_2)a \sin\theta \qquad (7)$$

où $$\sin\theta = y/r = \frac{y/d}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}$$

Alors,

$$\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t - (k_1 - k_2)d\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2} + \frac{(k_1 + k_2)a(y/d)}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}} \qquad (8)$$

Or, sur une crête ou tout autre point des franges qui se déplacent à la vitesse v_{fn} le déphasage φ est constant. donc $d\varphi = 0$. On en tire la vitesse v_{fn} au point A(x,y). Fixons la variable x et différentions l'expression (8):

$$d\varphi = 0 = (\omega_1 - \omega_2)dt + \left\{-(k_1 - k_2)y/d + (k_1 + k_2)\frac{a}{d}\left[1 - \frac{(y/d)^2}{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}\right]\right.$$

$$\times \frac{dy}{\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}$$

Finalement:

$$v_{fn} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}}{(k_1 - k_2)y/d - (k_1 + k_2)(a/d)\left[1 - \frac{(y/d)^2}{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}\right]} \qquad (9)$$

La vitesse des franges selon O-y dépend donc de la position dans le plan x-O-y. L'énergie acoustique ré-émise par un point diffuseur B du plan (fig. 3-a) est donc modulée à une fréquence f_b qui dépend de l'interfrange b et de la vitesse de défilement des franges par rapport au point B (glace) qui se déplace lui-même à la vitesse v_{gf} relativement aux franges. On a:

$$f_b = \frac{v_{gf}}{b} \qquad (10)$$

Mais $(k_1 - k_2) = (\omega_1 - \omega_2)/c$ est en pratique très inférieur à $(k_1 + k_2) = (\omega_1 + \omega_2)/c$. De plus, si on ne considère que des points près de l'origine O, $y/d \ll 1$ et $x/d \ll 1$, de sorte que l'expression (9) se simplifie considérablement:

$$v_{fn} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)d/a}{k_1 + k_2} = \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}\right)\frac{cd}{a} = \left(\frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}\right)\frac{cd}{a}$$

ou encore:

$$\boxed{v_{fn} = \left(\frac{\Delta f}{f_o}\right)\frac{cd}{2a}} \qquad (11)$$

ou $\Delta f = f_1 - f_2$ et $f_o = (f_1 + f_2)/2$, la fréquence moyenne.

4- CALCUL DE L'INTERFRANGE

Une frange d'interférence est le lieu des points où la phase est la même. D'une frange à la suivante, la phase varie de 2π rd. D'après (5), le déphasage en A des vibrations provenant des deux sources à un instant donné est:

$$\Delta\varphi' = (\omega_1 - \omega_2)t_o - (k_1 - k_2)r' + (k_1 + k_2)a \sin\theta'$$

Au point voisin A" (fig. 3-b) vu sous l'angle θ", le déphasage est:

$$\Delta\varphi'' = (\omega_1 - \omega_2)t_o - (k_1 - k_2)r'' + (k_1 + k_2)a \sin\theta''$$

Les points A et A" sont sur deux franges adjacentes où les phases des vibrations résultantes diffèrent de 2π. On a $r' = d'/\cos\theta'$ et $r'' = d'/\cos\theta''$, avec $d' = d\sqrt{1 + (x/d)^2}$. Posons $\Delta\theta = \theta'' - \theta'$, l'angle sous-tendu par l'interfrange b. Ainsi, vu que $\Delta\theta \ll 1$ rd,

$$\cos\theta'' \simeq \cos\theta' \simeq \cos\theta$$

$$\sin\theta'' = \sin(\theta' + \Delta\theta) \simeq \sin\theta' + \Delta\theta\cos\theta$$

Alors,

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi'' - \Delta\varphi' = 2\pi = (k_1 + k_2)\, a \cos\theta\, \Delta\theta$$

D'où,

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{(k_1 + k_2)a\cos\theta} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 + \lambda_2)\, a\cos\theta} \qquad (12)$$

ou encore:

$$\Delta\theta = \frac{c}{(f_1 + f_2)a\cos\theta} = \frac{c}{2f_o\, a\cos\theta} \qquad (13)$$

L'interfrange b est donné par

$$b = r\Delta\theta\cos\theta = d'\Delta\theta = d\sqrt{1 + (x/d)^2}\;\Delta\theta$$

D'où:

$$\boxed{b = \frac{cd}{2f_o a}\sqrt{1 + (x/d)^2 + (y/d)^2}} \qquad (14)$$

Au voisinage de l'origine:

$$\boxed{b = \frac{c\,d}{2\,f_o\,a}} \qquad (15)$$

5- VITESSE RELATIVE NAVIRE-GLACE

Il faut noter que dans cette analyse, on néglige l'effet Doppler, du fait que la vitesse du son est très supérieure à celle du navire par rapport à la glace. De plus, chaque point du plan x-O-y ré-émet des ultrasons dont la fréquence de battement est la même, tant du point de vue d'un observateur sur le navire que d'un autre au repos par rapport à la glace. Si en un point quelconque A(x,y), l'interfrange est plus grand qu'à l'origine, la vitesse (éq. 9) l'est également: c'est essentiel, du fait qu'en tout point A(x,y), un observateur doit percevoir la même fréquence de battement.

Si v_{gn} est la vitesse de la glace relativement au navire, v_{fn} la vitesse des franges relativement au navire et v_{fg} celle des franges relativement à la glace, on a:

$$v_{fg} = v_{fn} - v_{gn}$$

$$v_{gn} = v_{fn} - v_{fg} \qquad (16)$$

A partir des relations (10), (11) et (15), on obtient:

$$\boxed{v_{gn} = \frac{cd}{2af_o} (\Delta f - f_b)} \qquad (17)$$

Remarquons que d'après (9), v_{fn} est négatif (fig. 3-a) quand $f_1 > f_2$. Mais notons que dans (17), on doit prendre la valeur absolue de Δf et que f_b est essentiellement positive.

En pratique, on prendra de préférence $f_2 > f_1$, de sorte qu'une augmentation de fréquence de battement perçue f_b correspond à une avance dans la glace. Pour une plus grande précision, on mesurera la période de battement $T_b = 1/f_b$.

6- EXEMPLE DE CALCULS

Données:

$c = 330$ m/s ; $d = 8$ m ; $a = 0,5$ m

$f_o = 30$ kHz ; $\Delta f = 300$ Hz: $f_b = 305$ Hz

L'interfrange est:

$$b = \frac{330 \times 8}{2 \times 300 \times 0,5} = 88 \text{ mm}$$

Vitesse v_{gn}:

$$v_{gn} = b\,(\Delta f - f_b) = 0,088\,(300 - 305)$$

$$v_{gn} = -0,44 \text{ m/s}$$

7- EXCITATION DES SOURCES

Les sources doivent produire des trains d'ondes de durée inférieure au temps d'aller-retour à la la surface de l'eau.

$$\tau = 2d/c \qquad (18)$$

Dans l'intervalle suivant, une des deux sources pourra agir comme récepteur. Cette durée pourra être fixe ou auto-adaptable selon la distance de la surface.

L'expression de τ portée dans (17) donne

$$\boxed{v_{gn} = \frac{c^2\tau}{4af_o}(\Delta f - f_b)} \qquad (19)$$

8- CORRECTION POUR LES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE

La vitesse du son dans l'air est donnée par

$$c = \sqrt{\gamma RT/M} \qquad (20)$$

où $\gamma = c_p/c_v$ est le rapport des chaleurs spécifiques de l'air à pression et à volume constants; $\gamma = 1{,}40$ pour l'air;

$R = 8{,}314\ J\ K^{-1}mole^{-1}$ est la constante des gaz;
T est la température absolue en kelvins;
M est la masse moléculaire moyenne de l'air: $M = 29$ g/mole.

Or, à $T_o = 273$ K (0° C), $c = c_o = 331$ m/s dans l'air sec. Comme

$$c^2/c_o^2 = T/T_o,$$

on a

$$c^2 \simeq 400\ T, \text{ de sorte que (19) devient}$$

$$\boxed{v_{gn} \simeq \frac{100\tau T}{a f_o}(\Delta f - f_b)} \qquad (21)$$

9- GÉOMÉTRIE DU SYSTÈME DE MESURE

Il faut éviter de capter l'énergie réfléchie directement vers les émetteurs par la surface plane de l'eau, car elle est généralement beaucoup plus élevée que l'énergie diffusée. Si la première domine, vu que sa fréquence de battement est Δf, on mesurera $v_{gn} = 0$. Pour éviter cet inconvénient, les émetteurs seront orientés de quelques degrés vers l'extérieur du navire, de façon que l'énergie diffusée soit dominante au récepteur (fig. 4).

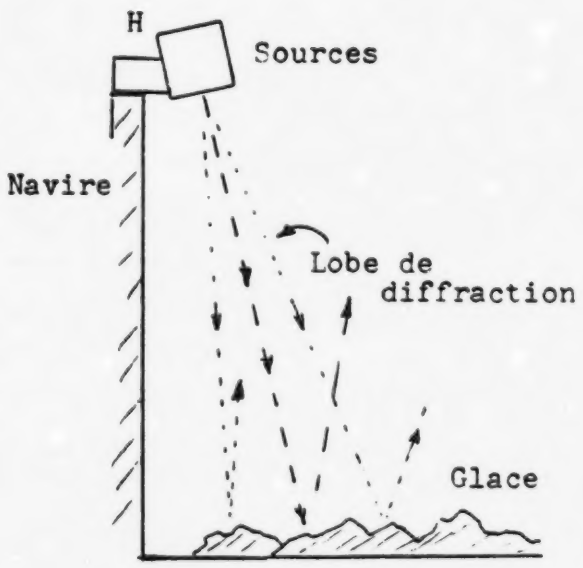


Figure 4

10- EFFET DU VENT SUR LA MESURE

Un vent uniforme qui souffle selon l'axe du navire O-y (fig. 1, 3) n'affecte pas la fréquence de battement perçue f_b.

Par contre, des différences de vitesse du vent le long des parcours r_1 et r_2 entraîne une variation de f_b. En pratique, ces différences de vitesse seront fluctuantes, de sorte qu'il y aura une variation aléatoire δf_b de la fréquence de battement, causant une fluctuation δv_{gn} de la mesure.

Vu la nature aléatoire de ces variations, il devrait suffire de faire la moyenne de f_b sur un intervalle de mesure pour éliminer largement cet effet. Si un intervalle τ ne suffit pas, on fera la moyenne sur plusieurs consécutifs. Ainsi, avec les données vues en 6- plus haut, on calcule $\tau = 0{,}048$ s; avec une fréquence de battement de 300 Hz, il y a donc environ 14 périodes de battement dans l'intervalle τ. La moyenne devrait être alors satisfaisante.

11- ORIENTATION DES SOURCES

Les deux sources doivent être orientées de façon que leurs lobes principaux de diffraction se superposent; c'est alors que l'intensité de l'énergie diffusée utile est maximale. Avec 2a = 1 mètre et d = 6 mètres, on fera l'inclinaison $\beta = 5^\circ$ environ. Ce réglage ne devrait pas être critique. *Voir page 2

* * * * * * * * * * *

VÉLOCIMÈTRE ULTRASONORE

Etude des conditions de fonctionnement

Jean-Luc Dion, ing.-Dr
SUPRATEC inc.
Septembre 1983

Introduction

Dans une précédente étude (*), nous avons analysé le fonctionnement d'un vélocimètre ultrasonore fonctionnant sur le même principe que l'appareil à laser SOM-10C de GEO-TEC. Dans cette analyse qui est toujours valable, on traitait d'un cas assez idéalisé où 1° l'effet de l'ouverture des faisceaux ultrasonores 2° l'effet de la fluctuation de la hauteur des centres de diffusion étaient négligés. On a supposé en somme que les ondes étaient planes, comme c'est pratiquement le cas pour deux faisceaux laser qui interfèrent.

Or, en pratique, les faisceaux ont une certaine ouverture θ_o définie comme le rayon angulaire du lobe central de diffraction (si l'on suppose une diffraction idéale), comme on le voit à la fig. 1. De plus, les centres de diffusion (les blocs de glace) sont à des hauteurs diverses pouvant atteindre B. Il s'ensuit que la fréquence de battement perçue au récepteur R varie selon l'origine de l'écho dans la zone ABA'. Il y a donc une incertitude à déterminer sur la mesure de la vitesse effective du système (navire) par rapport aux centres de diffusion (glace).

Nous rapportons ici les résultats d'une simulation par ordinateur des conditions rencontrées en pratique, afin de déterminer les limites supérieures d'incertitudes sur les mesures. Les conclusions essentielles sont les suivantes:

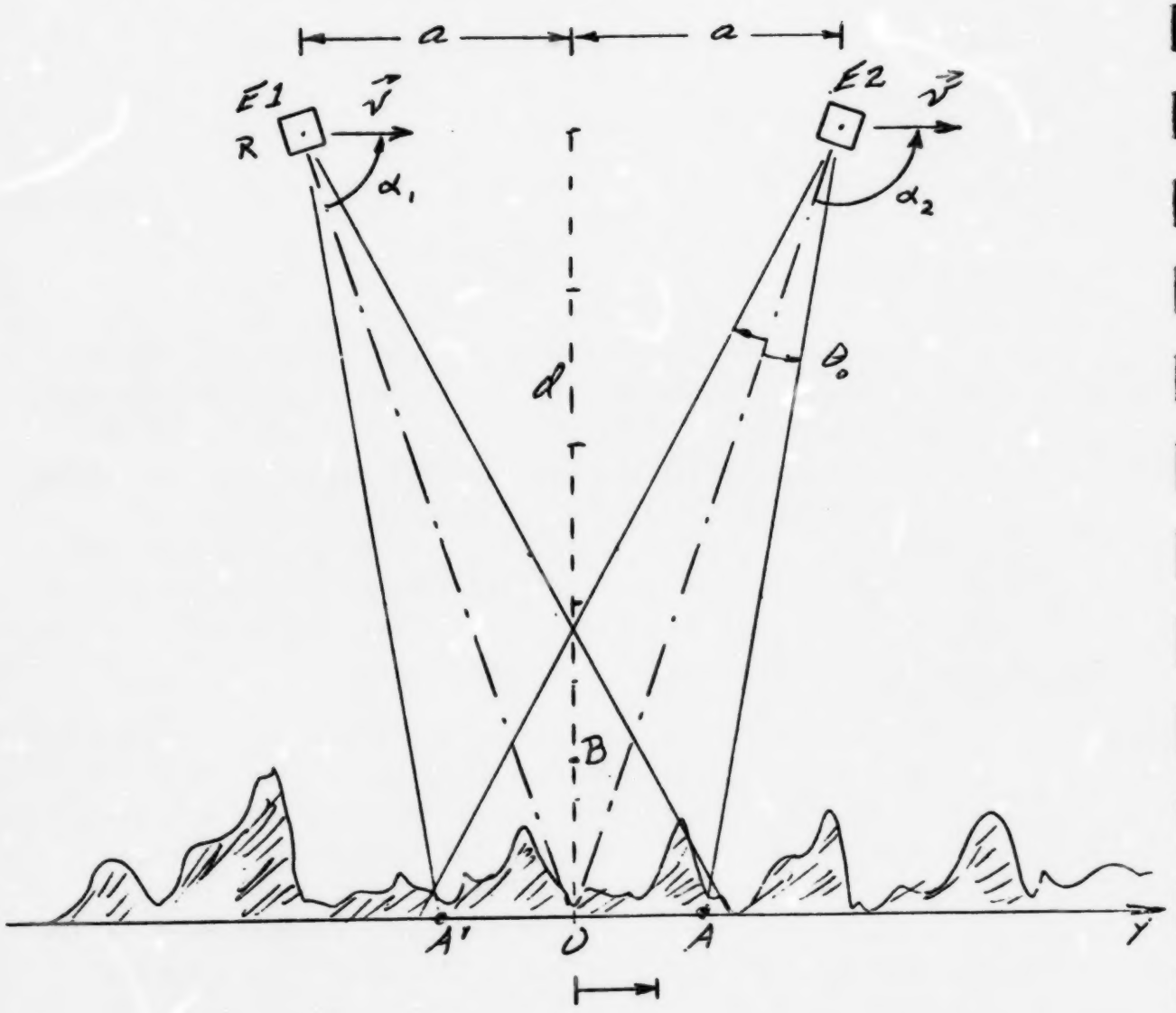


Figure 1

1- Avec le système à deux sources considéré jusqu'ici, l'incertitude pourrait atteindre 30% dans certaines conditions défavorables.

2- L'incertitude diminue avec l'écartement des émetteurs.

3- Il n'y a pas d'avantages à priori dans l'utilisation d'une différence de fréquence élevée $f_1 - f_2$.

4- Il n'y a pas d'avantages à utiliser deux émetteurs. C'est même un inconvénient si l'un des deux sert de récepteur, si leurs bandes passantes sont étroites. En particulier, il n'est alors pas possible d'utiliser une commande automatique de gain.

5- Il semble préférable d'utiliser un seul émetteur donnant un faisceau incliné d'environ 30° sur l'horizontale. L'émetteur peut servir de récepteur pendant qu'il est inactif, ou on peut avoir un récepteur adjacent.

6- Dans ce dernier cas, on peut utiliser au récepteur un amplificateur avec commande de gain automatique pour compenser les fluctuations du signal reçu qui peuvent être considérables (plus de 40 dB). Ce signal peut ensuite être combiné à un signal local de fréquence différente, de sorte qu'il soit possible de savoir le signe de la vitesse.

1. MÉTHODE D'ANALYSE

Dans le système de la fig. 1, l'émetteur E1 sert de récepteur R. La vitesse v est la composante horizontale de la vitesse du système par rapport à la glace. L'émetteur E1 a une fréquence f_1 et son écho une fréquence donnée par (*)

$$f_1' = \frac{1 + (v/c)\cos\alpha_1}{1 - (v/c)\cos\alpha_1} f_1 \qquad (1)$$

(*) "Ondes et vibrations", par J.L. Dion (C.E.C., Montréal 1974).

Le signal diffusé venant de S2 a une fréquence

$$f_2' = \frac{1 + (v/c)\cos\alpha_1}{1 - (v/c)\cos\alpha_2} f_2 \qquad (2)$$

où c est la vitesse du son dans l'air (340 m/s à 20°C).

Pour les points sur l'axe O-y:

$$\cos\alpha_1 = \frac{y + a}{\sqrt{d^2 + (y + a)^2}} \qquad (3)$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{y - a}{\sqrt{d^2 + (y - a)^2}} \qquad (4)$$

En posant $y = r\,a$ et $d = s\,a$, on a:

$$G = \cos\alpha_1 = \frac{r + 1}{\sqrt{s^2 + (r + 1)^2}} \qquad (5)$$

$$H = \cos\alpha_2 = \frac{r - 1}{\sqrt{s^2 + (r - 1)^2}} \qquad (6)$$

Si $f_o = (f_1 + f_2)/2$ et $\Delta f = f_1 - f_2$, on obtient

$$f_1' = \frac{(1 + Gv/c)}{(1 - Gv/c)} (f_o + \Delta f) \qquad (7)$$

$$f_2' = \frac{(1 + Gv/c)}{(1 - Hv/c)} (f_o - \Delta f) \qquad (8)$$

Les résultats obtenus se résument dans la figure 2. Les calculs ont été faits pour une fréquence moyenne f_o = 34 kHz et Δf = 500 Hz (f_1 = 33,5 kHz, f_2 = 34,5 kHz). On peut lire la fréquence de battement mesurée en fonction de la vitesse pour diverses valeurs de l'inclinaison des faisceaux ultrasonores par rapport à la verticale ($\alpha_1 = -\alpha_2$). Supposant α = 30° et une ouverture de faisceau de 10°, on voit (point A) qu'une fréquence mesurée de 1460 (f_b) peut correspondre à des vitesses de 2,45 à 3,15 m/s dans le pire des cas; ce qui correspond à une incertitude de 12,5%. Par contre, pour α = 60°, cette incertitude devient 31%. Dans ces conditions, il y a nettement avantage à utiliser des transducteurs fortement inclinés sur la verticale.

Toutefois, il n'y a pas de véritable avantage à utiliser un deuxième transducteur tel que E2. Il a été introduit à la suite d'une transposition de la technique optique au domaine acoustique. En optique, les deux faisceaux laser (subdivision d'un seul) sont requis pour produire un signal de battement; c'est la seule possibilité. Mais dans le domaine acoustique, le signal de référence peut être combiné électroniquement à l'écho provenant d'un seul émetteur. Un avantage notable est alors que le signal reçu peut être amplifié par un amplificateur à gain commandé par le signal, avant addition au signal de référence. Ceci devrait permettre une évaluation plus précise de la fréquence de battement en réduisant considérablement le bruit dû aux fluctuations de niveau de l'écho.

Nous avons fait des calculs permettant de comparer les deux techniques. Dans le système utilisant un seul transducteur (Fig. 3), la fréquence de l'écho est donnée par

$$f = \frac{1 + (v/c)\cos\alpha}{1 - (v/c)\cos\alpha} f_o \qquad (c)$$

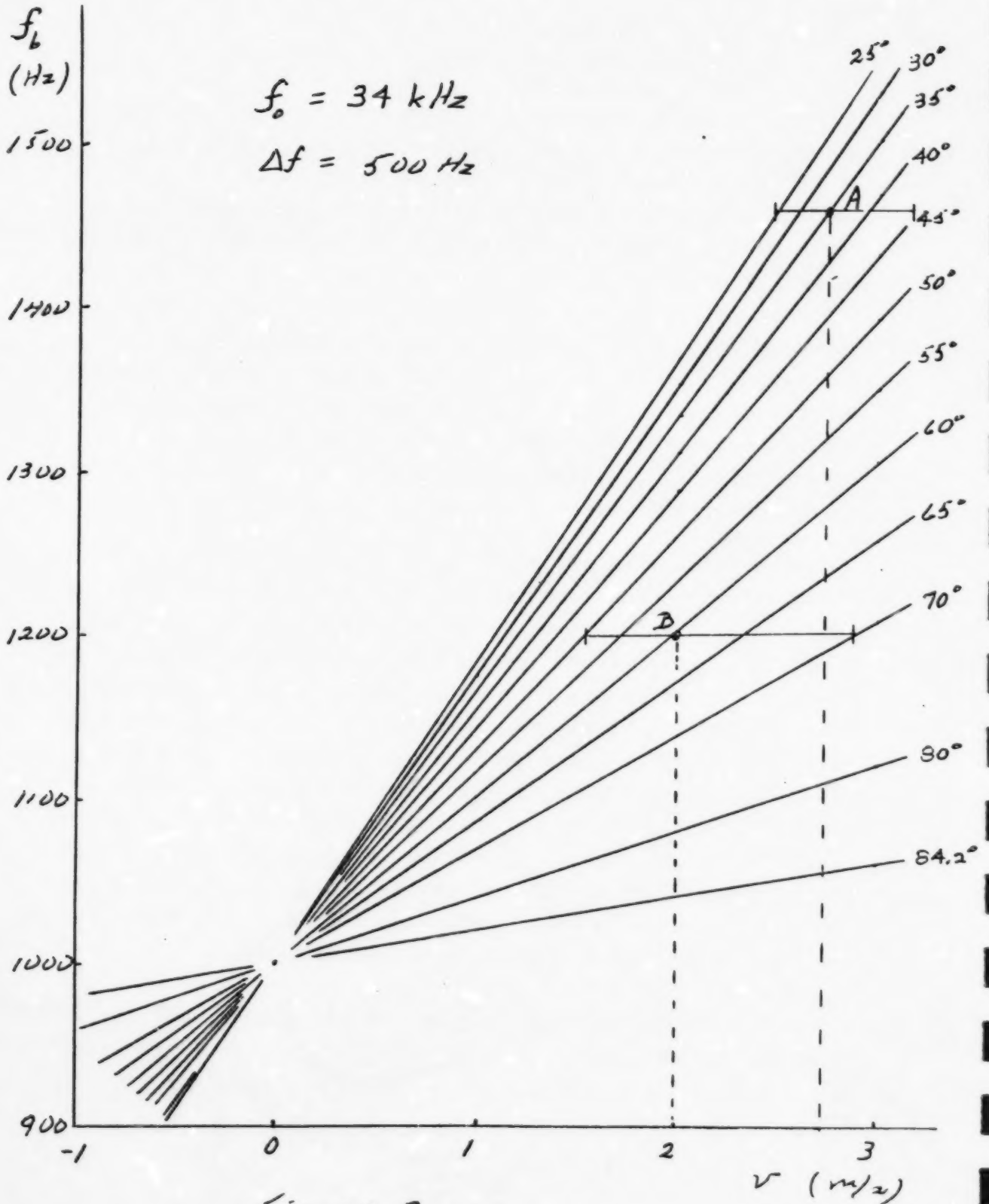
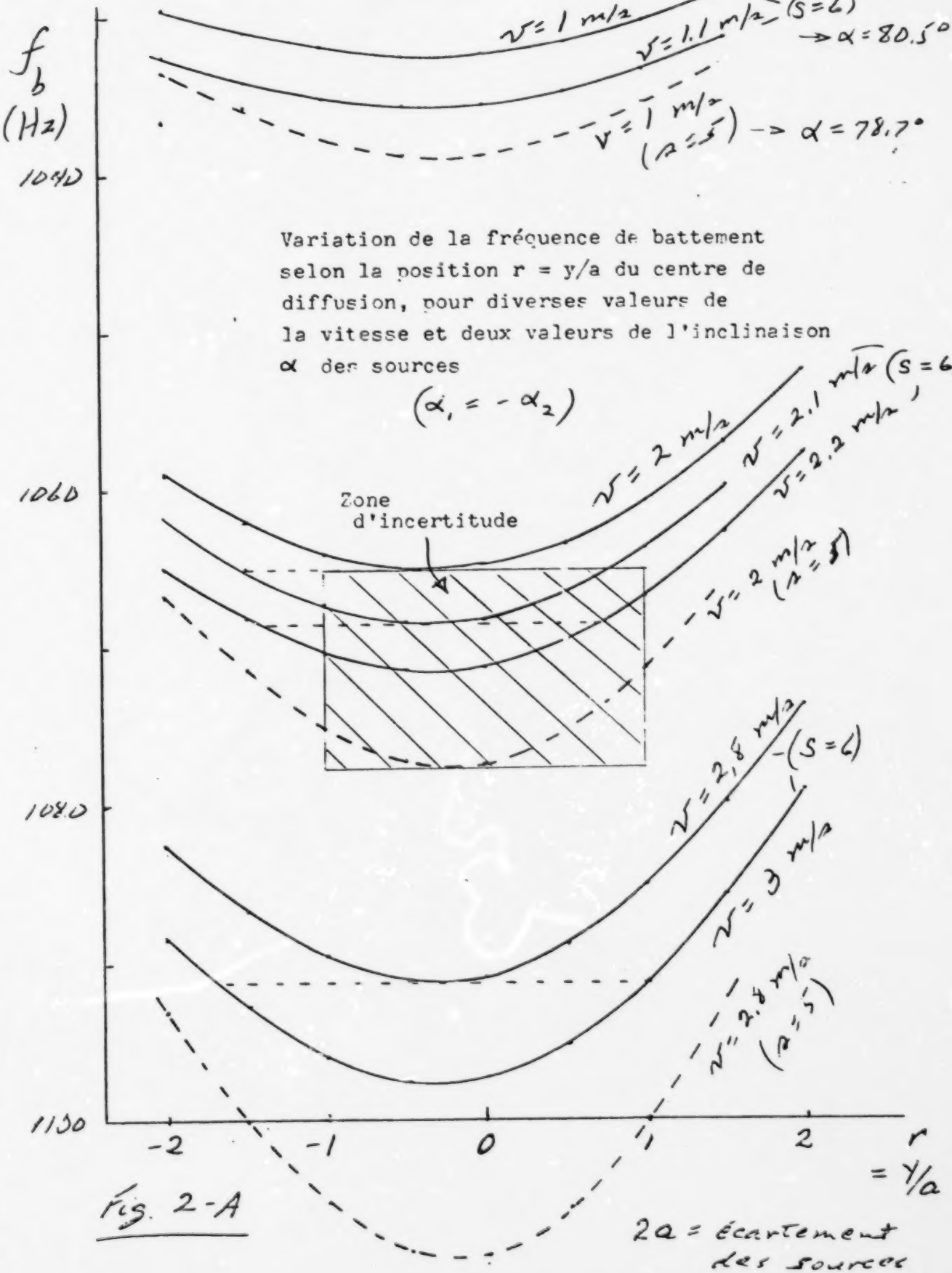

f_b (Hz)
f_o = 34 kHz
Δf = 500 Hz
1500
1400
1300
1200
1100
1000
900
-1
0
1
2
3
v (m/s)
25°
30°
35°
40°
45°
50°
55°
60°
65°
70°
80°
84.2°
A
B

FIGURE 2



Variation de la fréquence de battement selon la position r = y/a du centre de diffusion, pour diverses valeurs de la vitesse et deux valeurs de l'inclinaison α des sources

$(\alpha_1 = -\alpha_2)$

Fig. 2-A

2a = écartement des sources

On peut alors soustraire f de f_o pour obtenir une fréquence de battement

$$f_b = f - f_o$$

La figure 4 montre cette fréquence f_b en fonction de la vitesse v pour différentes valeurs d'inclinaison du faisceau sur l'horizontale. On voit que pour $\alpha = 30^o$, la pire incertitude probable est de 10,3% que l'on peut comparer à 12,5% avec la technique précédente. Considérant l'utilisation de la commande de gain automatique et une ouverture de faisceau qui peut possiblement être de moins de 5^o, on peut envisager une incertitude possible de 5% seulement avec cette deuxième méthode.

La fréquence soustraite de celle de l'écho peut être f'_o, différente de f_o, de façon à avoir $f_b > 0$ quand v = 0. Il est alors possible de déterminer le signe de la vitesse, comme avec la méthode précédente utilisant deux émetteurs. Par exemple, avec f'_o = 33 kHz (f_o = 34 kHz), la fréquence de battement passe de 825 à 1 kHz pour v variant de -1 m/s à 0, et passe de 1 kHz à 1,5 kHz pour v variant de 0 à 3 m/s à peu près.

Dans tous les cas, il est sous-entendu que l'émission est pulsée, de façon que l'émetteur n'interfère pas avec le récepteur. La durée maximale des trains d'ondes doit être égale au temps d'aller-retour du signal.

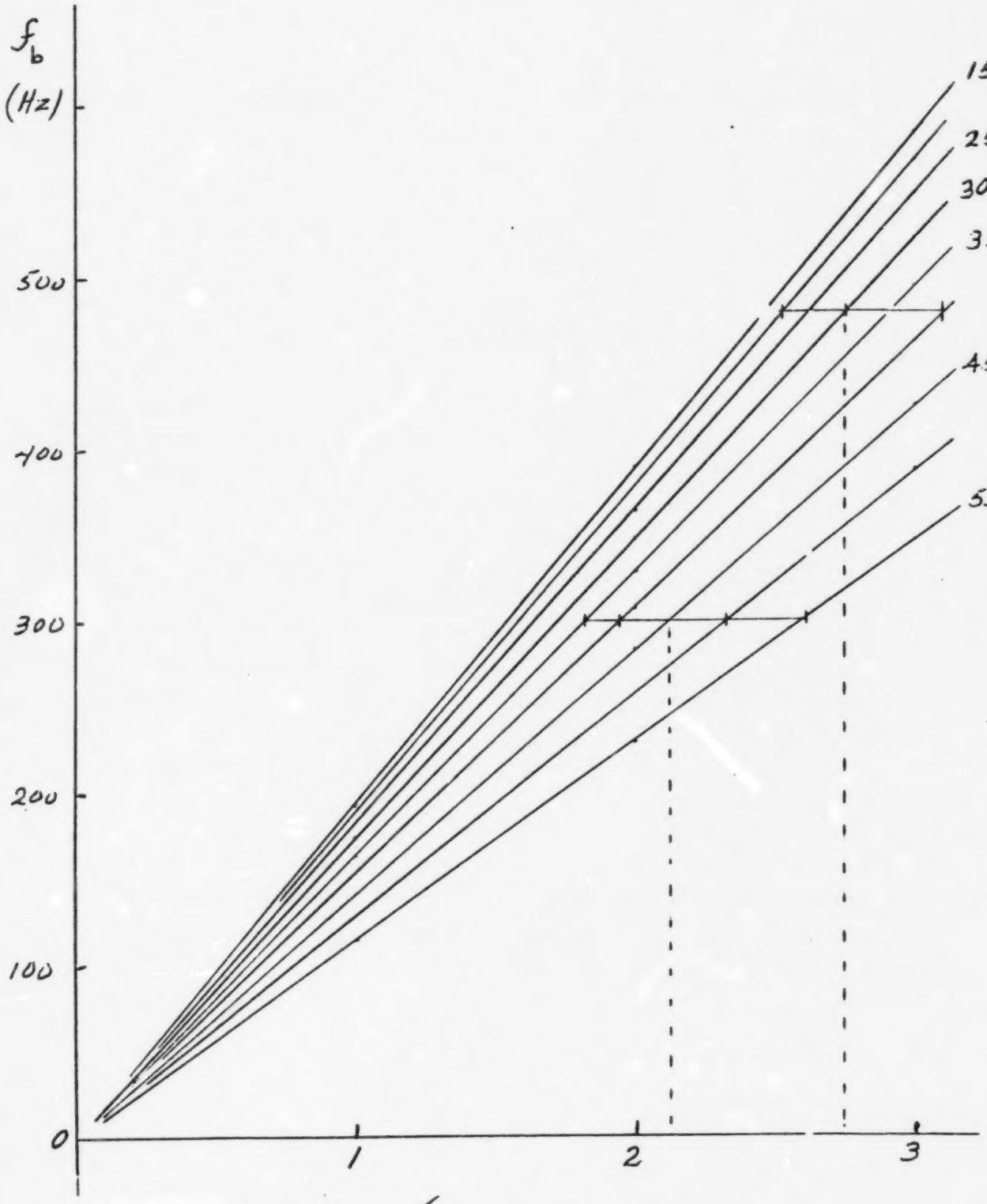


Figure 4

CONCLUSIONS

Nous avons vérifié que si l'on ne tient pas compte de l'ouverture des faisceaux, la présente analyse donne les mêmes résultats dans les mêmes conditions: à la fig. 2-A, v = 1 m/s, avec r = 0 (Diffusion en O, fig. 1) et s = ϵ (α = 80,6°), on lit 1032,4 Hz = f_b . L'application de la formule (17) du rapport de mars donne f_b = 1033,3 Hz.

Toutefois, si l'on tient compte de l'ouverture des faisceaux et des variations de hauteur des centres de diffusion, l'incertitude peut atteindre 30% quand les faisceaux sont faiblement inclinés sur la verticale. On constate que la précision s'améliore avec l'écartement des émetteurs.

Il n'y a pas d'avantage à utiliser deux émetteurs. C'est même un inconvénient, particulièrement si leurs bandes passantes sont étroites et s'ils doivent fonctionner à des fréquences différentes (NOTE: le Δf dans la présente étude est la moitié de celui défini dans la précédente). De plus, les fluctuations de niveau de l'écho se superposent au battement, ce qui doit entraîner de plus grandes erreurs.

Il semble préférable de n'utiliser qu'un seul émetteur incliné d'environ 30° sur l'horizontale. Il peut servir de récepteur quand il est inactif, ou on peut avoir un récepteur distinct.

Il doit y avoir avantage à utiliser au récepteur un amplificateur avec commande de gain automatique pour compenser les fluctuations de niveau des échos.

On peut alors faire la différence de fréquence de ce signal et d'un signal de référence dont la fréquence est de 1 ou 2 kHz inférieure à celle de l'émetteur.

On peut alors faire la différence de fréquence de ce signal et d'un signal de référence dont la fréquence est de 1 ou 2 kHz inférieure à celle de l'émetteur.

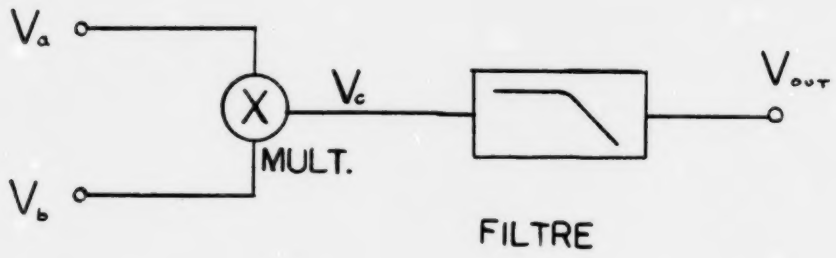
Dans ces conditions, il devient possible de considérer une précision supérieure à 10⁻³ sur la mesure des vitesses.

* * * * * * * * * * * * *

Appendice B

Théorie de la détection hétérodyne

THEORIE DE LA DETECTION HETERODYNE SIMULEE



$$V_a = A\cos(2\pi f_a t)$$

$$V_b = B\cos(2\pi f_b t)$$

$$V_c = \frac{V_a V_b}{10} = \frac{AB}{10} \times \cos(2\pi f_a t) \times \cos(2\pi f_b t)$$

$$= \frac{AB}{20} \times (\cos(2\pi(f_a - f_b) + \cos(2\pi(f_a + f_b)))$$

SI UNE COMPOSANTE DC EST ADDITIONNEE A L'UNE DES ENTREES:

$$V_c = \frac{[A\cos(2\pi f_a t) + A_{dc}]B\cos(2\pi f_b t)}{10}$$

$$V_c = \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a - f_c)t) + \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a + f_b)t) + \frac{A_{dc}B}{10}\cos(2\pi f_b t)$$

SI LA COMPOSANTE DC SE TROUVE SUR LES 2 ENTREES:

$$V_c = \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a - f_b)t) + \frac{AB}{20}\cos(2\pi(f_a + f_b)t) + \frac{A_{dc}B}{10}\cos(2\pi f_b t)$$

$$+ \frac{AB_{dc}}{10}\cos(2\pi f_a t)$$

Appendice C

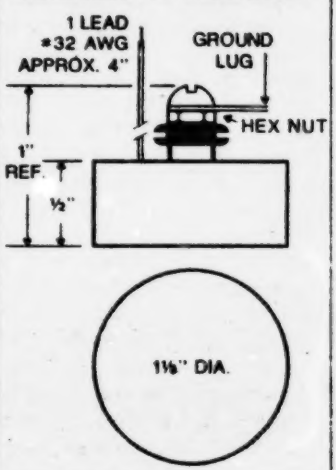
Les détecteurs-émetteurs CP Channel

CHANNEL PRODUCTS
Air Transducers

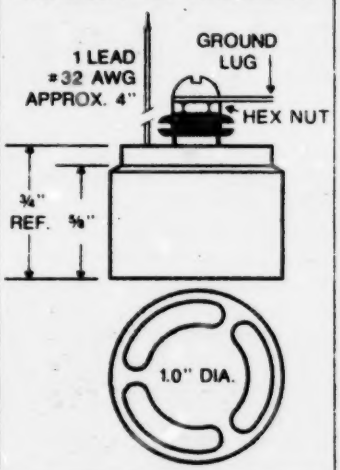
Typical Specifications (Nominal values except where noted otherwise)

NEW CPAX AIR TRANS-DUCERS

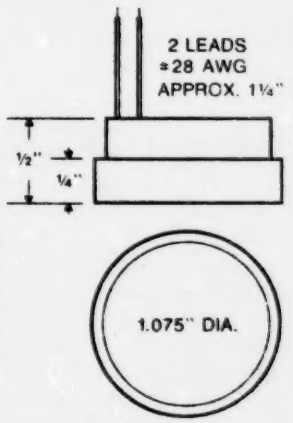
Model CPAX 40*
Ultrasonic Air Transducer



Model CPAX 40-HE*
Ultrasonic Air Transducer



Model CPAX 180
High Frequency
Air Transducer



		CPAX 40*	CPAX 40-HE*	CPAX 180
Frequency of Resonance (Minimum Impedance)	f_m	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	180 ± 3 kHz
Frequency of Anti-Resonance (Max. Impedance)	f_n	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	Can be adjusted between 37 and 41 kHz.	220 kHz
Ratio	f_n/f_m	1.015	1.015	1.20
Capacitance	Ce	1.2 nF	1.2 nF	125 pF
Impedance	At f_m At f_n	1.0 k ohms 6.0 k ohms	1.0 k ohms 10.0 k ohms	500 ohms 200 k ohms
Beamwidth (10 dB)		45-50° (plus side lobes)	20-25° (plus side lobes)	Approx. 10° (plus side lobes)
Bandwidth	T R R	1% untuned 1% open circuit 2.5% with 10 k ohms load	1% untuned 1% open circuit 2.5% with 10 k ohms load	2% untuned 2% open circuit
Sensitivities	T R R	4 μ bars/volt @ 1 foot 1.5 mv/μ bars (open circuit) 0.75 mv/μ bars with 10 k ohms load	10 μ bars/volt @ 1 foot 5 mv/μ bars (open circuit) 2 mv/μ bars with 10 kohms load	2 μ bars/volt @ 1 foot 0 2 mv/μ bars (open circuit)
Drive Voltage		25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)	25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)	25 v max. (continuous) 250 v peak (low duty cycle pulse)

Transmitter (T) f_m and Receiver (R) f_n can be matched as follows:
(CPAX 40 and CPAX 40-HE)

Code	Center Frequency (±0.25 kHz)	Code	Center Frequency (±0.25 kHz)
A	37.0	F	39.5
B	37.5	G	40.0
C	38.0	H	40.5
D	38.5	I	41.0
E	39.0		

*Available in lower frequencies to approximately 23 kHz with changes in specifications

Air Transducers

Model CPAX 40*

Channel Product CPAX 40 is an ultrasonic transducer for use in an air medium. The radiating face is a metallic diaphragm. The unit is basically sealed.

It is recommended that for operation as a transmitter the unit be operated at or near the minimum impedance frequency (f_m). As a receiver it should be operated at or near the maximum impedance frequency (f_n). As an operating pair, maximum sensitivity is achieved with the transmitter f_m equal to the receiver f_n. These frequencies are affected by mounting and circuit conditions, thus care must be exercised for a proper selection.

Model CPAX 40-HE*

Channel Products CPAX 40-HE is a high efficiency, ultrasonic transducer for use in an air medium. The radiating face is a metallic diaphragm. The unit is basically sealed.

On-axis sensitivity has been increased by means of an optimally positioned front horn. This feature has also resulted in the increase in directivity required for many applications.

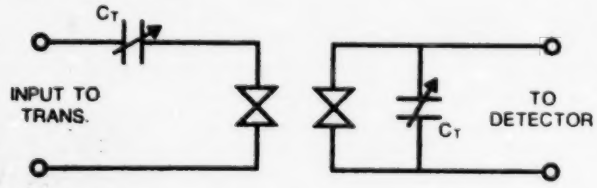
It is recommended that for operation as a transmitter the unit be operated at or near the minimum impedance frequency (f_m). As a receiver, it should be operated at or near maximum impedance frequency (f_n). As an operating pair, maximum sensitivity is achieved with the transmitter f_m equal to the receiver f_n. These frequencies are affected by mounting and circuit conditions, thus care must be exercised for a proper selection.

Model CPAX 180

Channel Products CPAX 180 is a high frequency transducer for use in an air medium. The radiating face is a phenolic diaphragm which is driven by a piezoelectric ceramic operating in a longitudinal mode.

This unit is for operation at short range because, at this frequency, attenuation in air may approach 3 dB/foot. It has been effectively utilized in proximity detection at a range of up to two feet.

Typical air transducers are best matched with the receiver tuned to anti resonance (frequency of maximum impedance) and the transmitter tuned to resonance (frequency of minimum impedance). This unit is designed only for resonance operation. However, by series tuning the "transmitter" with a capacitance in the range 100 to 150 pf and shunt tuning the "receiver" with a comparable value of capacitance, transmitting and receiving frequencies are "pulled" towards each other. Experimental effort is required to optimize such matching (since mounting, level and other circuit conditions also influence the operating frequency). An alternate approach to matching two CPAX 180's for transmitting and receiving would be to load the receiver with approximately 500 ohms. Again, experimental effort is suggested to determine the optimum load. Tuning with a load C_T is illustrated below:



**Available in lower frequencies to approximately 23 kHz with changes in specifications.*

Name _____ Title _____

Company _____

Address _____

City _____ State _____ Zip _____

☐ I am interested in Channel CPAX, ☐ Price ☐ Delivery

I ☐ am ☐ am not planning to purchase this type of product at this time

I anticipate this purchase ☐ 1-6 months ☐ over 6 months

Potential yearly quantity required _____

☐ Please send a sample of model number CPAX - _____

Possible application and/or question: _____

_____

☐ Please have a Channel Products technical representative contact me at

(telephone) _____ ext _____

Mail to.

CHANNEL PRODUCTS INCORPORATED
7100 Wilson Mills Road • Chesterland, Ohio 44026 • 216 423 0113

Appendice D

Les détecteurs-émetteurs de Supratec

SUPRATEC
RÉALISATIONS TECHNOLOGIQUES

Mesures et contrôles
Électronique
Micro-ordinateurs
Optique
Ultrasonique

3760, rue Montpellier, Trois-Rivières Ouest, Québec G8Y 3P2 Tél.: (819) 376-6000

TRANSDUCTEUR ULTRASONORE PIÉZOÉLECTRIQUE

Description abrégée

(Voir figure 0)

Fréquence de résonance:	35,2 kHz
Elément actif:	céramique piézoélectrique (Channel 5400) Diamètre: 76 mm Epaisseur: 12,8 mm
Résonateur:	céramique avec assemblages de blocs d'aluminium cimentés de chaque côté. Résonance fondamentale à 35,2 kHz.
Transformateurs d'impédance acoustique:	un disque d'acrylique lambda/4 cimenté aux blocs d'aluminium, plus un disque de mousse de polystyrène bleu lambda/4 cimenté à l'acrylique.
Impédance électrique:	1760 $\angle -40^\circ$ ohms à 35,2 kHz.
Tension maximale recommandée:	125 V efficaces à 35,2 kHz en mode continu. 175 V efficaces à 35,2 kHz en mode pulsé à 50%.
Masse:	environ 3 kg
Dimensions:	hauteur: 170 mm diamètre: 115 mm

* * * * * * * * *

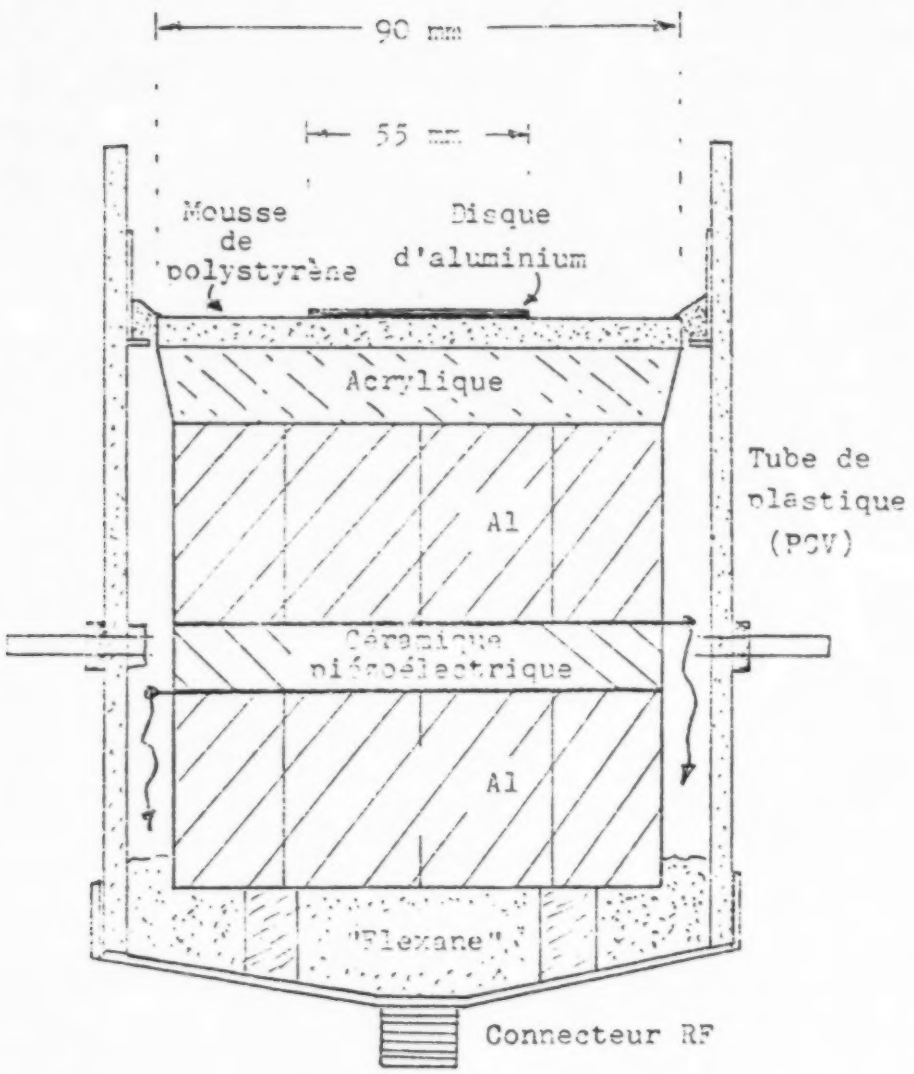


Figure 0 Coupe schématique du transducteur
La fixation par le milieu n'est pas montrée.

SUPRATEC INC.

MESURES SUR LE TRANSDUCTEUR

Appareils utilisés :

- Sonomètre Bruel & Kjaer modèle 2209
- Microphone B & K type 4133
- Filtre d'octave type 1613
- Amplificateur Krohn Hite Amp. 06
- Oscilloscope kikusui Us2 54
- Sondes 10:1 kikusui

Conditions de mesure

Réponse en fréquence:

(Fig. 1 et 2)

- filtre d'octave sur 31.5Khz
- sonomètre sur réponse rapide
- tension appliquée au transducteur 80V c-c
- table traçante HP Exy- 02
- distance entre le sonomètre et le transducteur = 1.6 mètre
- sonomètre sur l'échelle de 80 dB

Patron de rayonnement:

- filtre d'octave sur 31.5Khz
- sonomètre sur réponse rapide
- tension appliquée au transducteur 56V c-c
- distance entre le sonomètre et le transducteur = 1m.

Figures de rayonnement

Figure 3 :

Tension appliquée : 56 V c-c
Fréquence : 35.19 Khz
Distance : 1 mètre

Données:

angle	valeur lue au sonomètre
0	90 dB
2.5	85 dB
5.0	80 dB
7.5	90 dB
10	90 dB
15	81 dB
18	62 dB
20	75 dB
25	72 dB
30	62 dB

Figure 4

Tension appliquée : 56 V c-c
Fréquence : 35.19 Khz
Distance : 1 mètre

Données:

angle	valeur lue au sonomètre
0	88.5 dB
2.5	84 dB
5	70 dB
7.5	85.5 dB
10	76 dB
15	64 dB
20	77.5 dB
25	68 dB
30	62 dB

Figure 3: réponse prise sans disque d'aluminium collé au centre de la face du transducteur

Figure 4: : réponse prise avec le disque d'aluminium collé au centre de la face du transducteur

Réponse Impulsionnelle

But: Mesurer le temps de montée et le temps de descente du transducteur en réponse à un signal pulsé de 35.19 Khz

Résultats:

temps de montée de 10% 'a 90% = 600 µsec.
temps de descente de 90% 'a 10%= 600 µsec.

Conditions de mesure:

-Sonomètre B&K 2209 sur échelle de 80 dB
-Tension appliquée = 80 V c-c
-Fréquence = 35.19 Khz
-Filtre d'octave sur 31.5 Khz
-Distance entre la face du transducteur et le microphone = 1mètre
-Tension lue sur ocsilloscope Kikusui
-Sonomètre sur réponse rapide
-Largeur des impulsions = 5msec.
-Période =10 msec.

Impédance mesurée à 35.19 Khz

module = 1760 ohms argument = -40 degrés (capacitif)
résistance série équivalente = 1360 ohms
capacité série équivalente = 3.98 nF

Transducteur utilisé comme récepteur

Distance entre le récepteur et l'émetteur	= 1 mètre
Fréquence utilisée	= 35.19 Khz
Puissance du signal sonore incident	= 82 dB
Signal mesuré au sonomètre avec filtre	
Tension lue à l'oscilloscope Kikusui	= 30 mV
Impédance d'entrée de l'oscilloscope	= 1Mohm

RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Transducteur complet sans disque sur la face avant.

Sonomètre B & K 2209
Micro B & K 4133
Filtre d'octave B & K 1613
f_o = 31,5 kHz
Distance: 1,6 m entre la face du transducteur et le micro
Tension appliquée: 80 $V_{c.c.}$

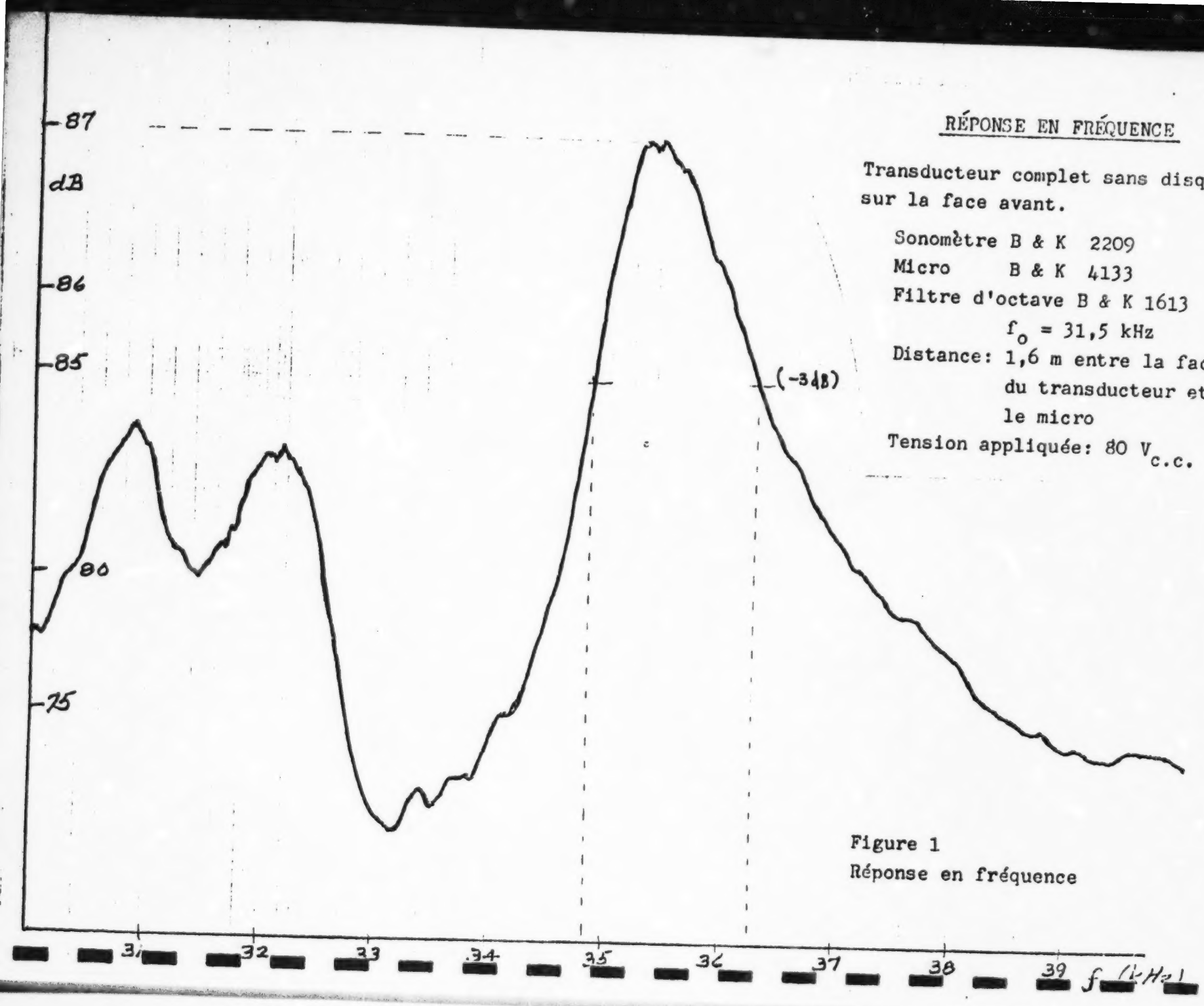
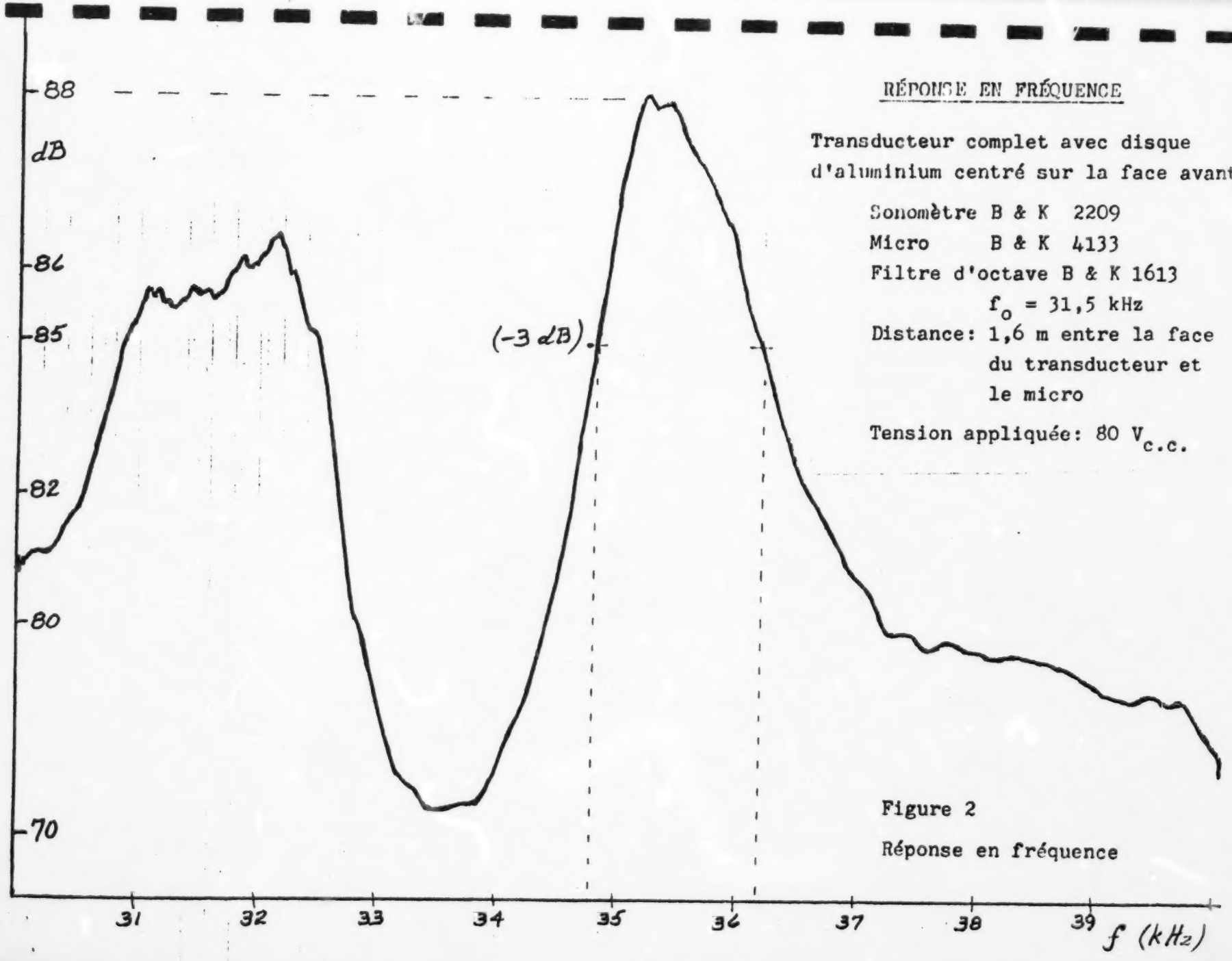


Figure 1
Réponse en fréquence



RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Transducteur complet avec disque d'aluminium centré sur la face avant.

Sonomètre B & K 2209
Micro B & K 4133
Filtre d'octave B & K 1613
f_o = 31,5 kHz
Distance: 1,6 m entre la face du transducteur et le micro

Tension appliquée: 80 $V_{c.c.}$

Figure 2

Réponse en fréquence

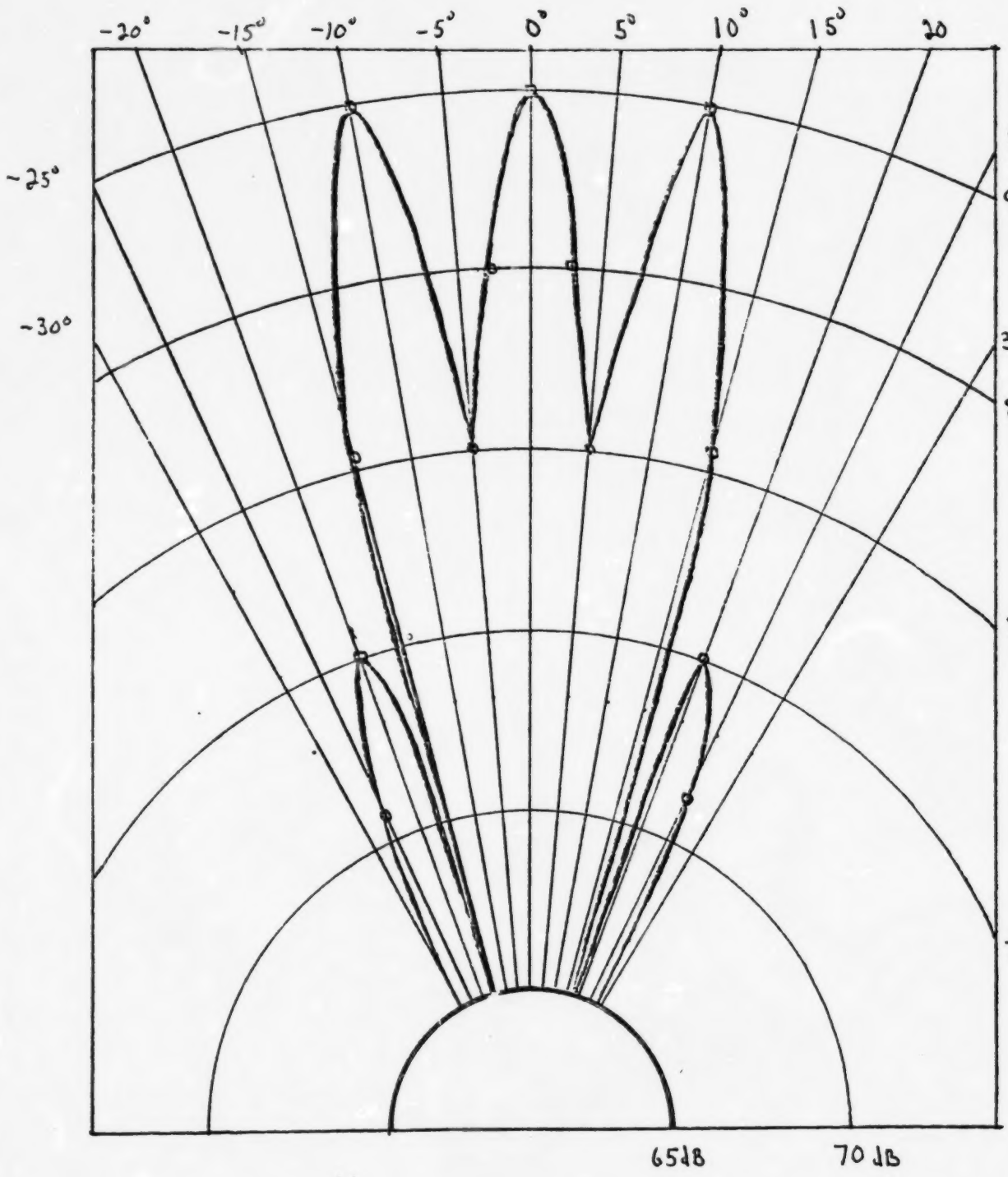


Figure 3 Diagramme de radiation
Transducteur sans disque à l'avant

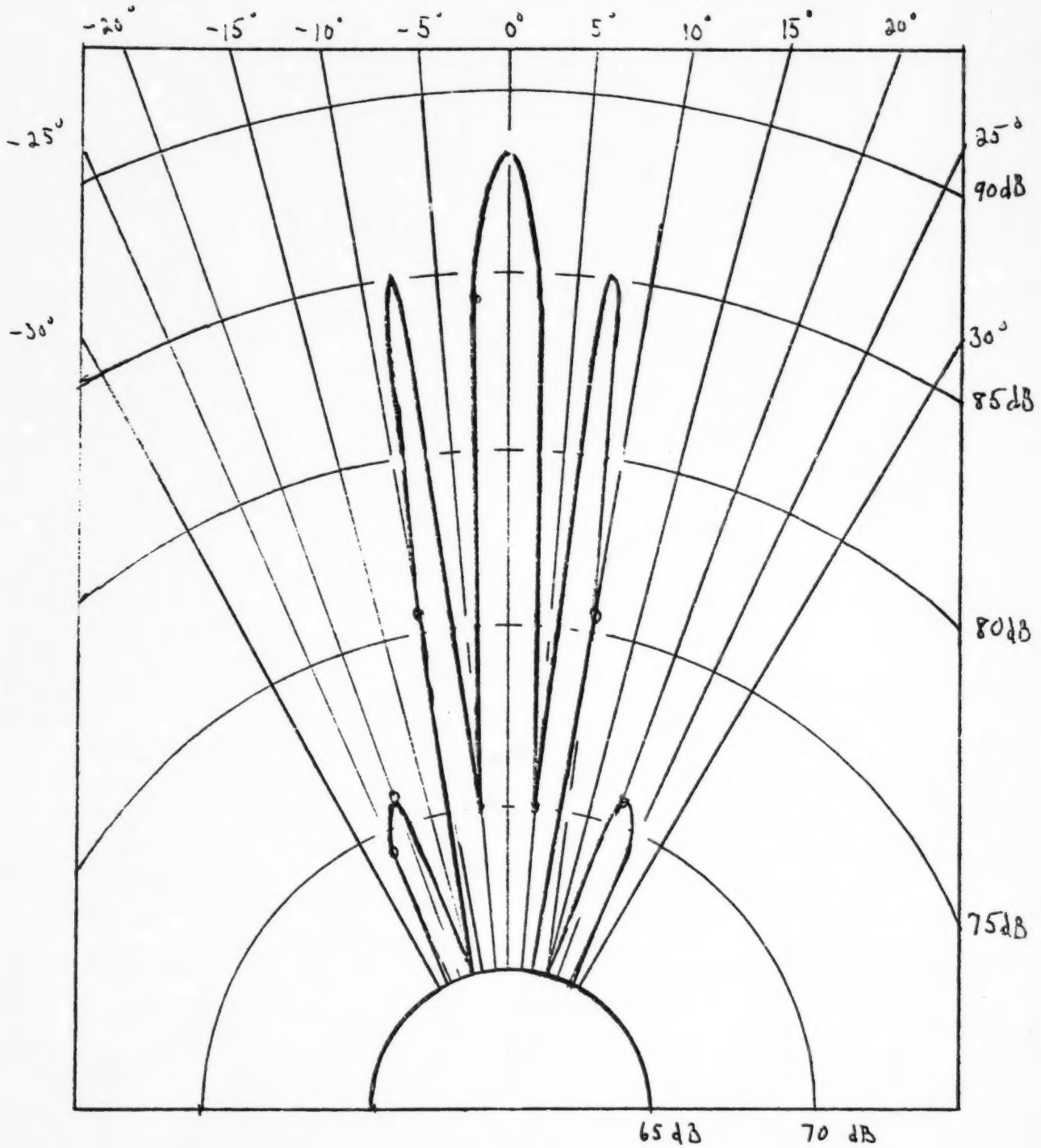


Figure 4 Diagramme de radiation

Transducteur avec disque d'aluminium collé sur la face avant.